

Tubos de luz, serão sistemas que permitem reduzir efetivamente o consumo energético? – um estudo exploratório

Diogo Filipe Pereira Cabral

Relatório da Dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. José Luís Alexandre



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho 2013

Resumo

Tendo em conta a atual preocupação mundial em reduzir o consumo energético global, uma de muitas problemáticas é o excesso de utilização de iluminação artificial em edifícios, mais concretamente em edifícios de serviços do tipo escritórios. Esta pode ser colmatada com melhor aproveitamento de luz natural, dado ser durante o dia que estes são maioritariamente utilizados. Desta forma, o estudo proposto neste trabalho, baseia-se na verificação e quantificação da redução do consumo energético associada à utilização de um dispositivo denominado tubo de luz num escritório.

Os consumos energéticos determinados abordaram não só as necessidades elétricas, em iluminação, como também térmicas, em sistemas AVAC, e no cômputo geral, ou seja, tendo em conta todas as parcelas envolvidas no consumo global de um escritório. Este pertence a um edifício de serviços comum localizado na cidade do Porto, estando situado numa zona central do mesmo de forma a reduzir fatores de influência nas necessidades térmicas da sala. Na verdade, são analisados cinco escritórios de profundidades diferentes, visto ser uma característica determinante na distribuição da iluminação natural ao apenas existir uma janela na sua única fachada exterior orientada a Sul. Para o efeito, foi utilizado um software de simulação de iluminação natural e artificial (DIALUX), determinando perfis de iluminação sem o efeito luminoso de tubos de luz. A contribuição luminosa proveniente de tubos de luz foi calculada também a partir de uma ferramenta de simulação (HOLIGILM). A integração da iluminação natural proveniente de tubos de luz com as restantes, foi feita a partir de um modelo de sobreposição de diversas fontes de luz, proposto e validado neste trabalho, permitindo desta forma, estabelecer perfis de iluminação com a utilização do dispositivo em causa. A verificação da necessidade de iluminação artificial foi realizada tendo em conta o limite de iluminância mínimo proposto na norma EN 12461.

Os resultados demonstram a expectável potencial poupança energética com a utilização de um tubo de luz, visto este aumentar o proveito de iluminação natural. No que toca ao consumo energético em iluminação artificial, foi determinada uma poupança aproximadamente de 25%. Quanto às necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento, notou-se, para as primeiras, um aumento muito pouco substancial, enquanto para a componente de arrefecimento a poupança energética poderá ascender a 7,5% no caso mais favorável e 5,8% no pior caso. A nível de consumo energético global, foi possível estimar uma redução em cerca de 5%. São ainda demonstrados resultados de poupanças obtidas com a introdução de um segundo tubo de luz nos dois escritórios de maior profundidade: relativamente à iluminação artificial, aumento em 10 pontos percentuais; no caso das necessidades térmicas de arrefecimento, um acréscimo entre 1 e 3 pontos percentuais; quanto ao consumo de energia global, constatou-se uma melhoria em 2 pontos percentuais.

Abstract

Reducing the world's energetic consumption is one of the most important problems society faces today, specifically reducing the amount of artificial illumination in infrastructures such as office buildings. We can address this problem by using natural illumination more efficiently, given that this type of building is used mainly during the day. This work focuses on the verification and quantification of the reduction in electric consumption when using a natural source of light, a light tube, in an office.

The electric and energetic consumptions we calculated take into account all the needs and office has: electrical, such as lighting; thermic, the AVAC systems; and general needs of energy in an office environment. The office we studied is part of a normal services and offices building in Porto, in the middle of the building, so that it can reduce the thermic influences in the rooms. We analyze five different rooms, with different lengths, as their length is a decisive characteristic when studying the distribution of natural light coming from one window facing south in this case. A natural illumination simulation software (DIALUX) was used to determine lighting profiles without the use of light tubes; a different software (HOLIGILM) was used to calculate the lighting profiles which were obtained from the use of light tubes. To match the different profiles and integrate the different lighting methods, a model which overlays different light sources, proposed and validated in this paper, was used, allowing us to obtain new lighting profiles which incorporate the light tube. The need for artificial illumination was done by following the lowest limit of luminance proposed in the EN 12461 regulation.

The results matched the expectations, showing an energetic saving by using a light tube, related to lighting, with up to 25% less usage of energy. The saving in energy related to the thermic needs was not as great, with the heating needs not being able to meet with the use of light tubes, and the cooling needs with a saving of 7,5% in the best case scenario and 5,8% in the worst case. The overall energy consumption saving is of about 5%. The study concerning the insertion of a second light tube in the longest offices is also studied: regarding artificial illumination, an improvement of 10 percentage points is achieved; in the thermic needs we were able to improve the consumption between 1 and 3 percentage points; and globally, an improvement of 2 percentage points was gained.

Abreviaturas

ADELINe - Advanced Day and Electric Lighting Integrated New Environment;

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado;

COP – Coeficiente de Desempenho (*Coefficient of Performance*);

DPF – Fator de penetração de luz natural (*Daylight Penetration Factor*);

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;

HOLIGILM – Hollow Light Guide Interior Illumination Method;

kgep – Quilograma equivalente de petróleo;

LCP - Laser Cut Panels;

MIEM – Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica;

PMMA - Polimetil-metacrilato;

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios;

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios;

IESNA - Sociedade Norte-americana de Engenharia da Iluminação (*Illuminating Engineering Society of North America*)

CFD – Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)

Nomenclatura

E_n	Energia	J
ν	Frequência	Hz
h	Constante Planck	J/s
λ	Comprimento de onda	nm
m	Massa	kg
v	Velocidade	m/s
T	Período	s
c	Velocidade da luz	km/s
ϕ	Fluxo luminoso	lm
S	Fluxo de energia	W
V	Sensibilidade relativa do olho humano	-
η	Eficiência energética	lm/W
P	Potência	W
I	Intensidade luminosa	cd
Ω	Ângulo sólido	sr
S	Área	m ²
r	Raio	m
d	Distância	m
L	Luminância	cd/m ²
E	Iluminância	lx
$a_{D,máx}$	Profundidade máxima	m
h_{Li}	Altura do topo da janela	m
h_{Ta}	Altura da base da janela	m

Agradecimentos

Ao Professor José Luís Alexandre, o meu agradecimento por toda a orientação, apoio e conhecimentos transmitidos durante a realização desta dissertação.

Ao Eng.º Alexandre Freire, agradeço a ajuda na fase inicial da estruturação do presente trabalho.

Ao Eng.º Carlos Brandão, agradeço a sua receptividade e disponibilidade na empresa Chatron, como também informações indispensáveis à realização deste trabalho.

À amiga e colega Karla Gonçalves, o meu obrigado por toda a disponibilidade e ajuda aquando da realização das simulações no programa TRNSYS.

Aos meus pais, o meu agradecimento por investirem na minha educação, pelos valores que me transmitiram, apoio e compreensão durante toda a minha vida académica.

À minha namorada, um obrigado muito especial só pelo apoio e incentivo contínuos como também pela transmissão de confiança e compreensão em todos os momentos.

Aos meus amigos de longa data, um muito obrigado pelo companheirismo constante, essencial para a minha motivação nos momentos mais complicados ao longo do meu percurso académico.

Aos todos os meus colegas e amigos de faculdade que, ao fazerem parte desta fase da minha vida, direta ou indiretamente, foram muito importantes para a conclusão do curso.

Tubos de luz, serão sistemas que permitem reduzir efetivamente o consumo energético? – um estudo exploratório

Índice de Conteúdos

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento e objetivos do trabalho.....	1
1.2.	Estrutura do trabalho e Temas Abordados	2
1.3.	Luz	2
1.3.1.	O fenómeno	2
1.3.2.	Grandezas Luminosas	5
1.4.	Aproveitamento da luz natural	8
1.4.1.	Fatores de influência no aproveitamento da luz natural	8
1.4.2.	Sistemas convencionais.....	12
1.4.3.	Sistemas não-convencionais.....	14
2.	Tubos de luz	17
2.1.	Componentes	17
2.1.1.	Elemento coletor.....	18
2.1.2.	Conduta refletora	20
2.1.3.	Elemento emissor	21
2.2.	Exemplos de sistemas existentes	22
2.2.1.	Tubos de luz horizontais com difusores longitudinais.....	22
2.2.2.	Tubos de luz com helióstato e difusão ao longo do tubo vertical	23
2.2.3.	Tubos de luz horizontais e verticais com dispersão luminosa ao longo dos tubos com recurso a LCP, prateleiras refletoras e anéis de PMMA	24
3.	Modelos de simulação dinâmica.....	25
3.1.	Modelos de simulação de iluminação	25
3.1.1.	Iluminação natural e artificial	25
3.1.2.	Iluminação natural de tubos de luz	28
3.2.	Modelos de simulação de necessidades energéticas	30
3.3.	Modelo de sobreposição de várias fontes luminosas	32
4.	Caso de estudo	35
4.1.	Caracterização do caso de estudo	36

4.2.	Caracterização do espaço interior	36
4.3.	Metodologia e determinação da distribuição das luminárias nos diferentes casos de análise	38
4.4.	Condições particulares de simulação	40
4.5.	Definição dos perfis de iluminação artificial	42
4.6.	Simulação da distribuição da iluminância a partir de tubos de luz.....	44
4.7.	Método de cálculo dos perfis de iluminação artificial com a contribuição do tubo de luz.....	46
4.8.	Simulação das Necessidades Térmicas de um sistema de climatização	49
4.9.	Simulação do consumo energético anual em iluminação artificial	50
5.	Apresentação e discussão de resultados	51
5.1.	Energia consumida em iluminação artificial	51
5.1.1.	Iluminação artificial sem tubo(s) de luz.....	51
5.1.2.	Iluminação artificial com tubo(s) de luz	53
5.1.3.	Poupança anual em iluminação artificial	55
5.2.	Energia consumida no sistema de climatização	57
5.3.	Energia global consumida	60
6.	Conclusões e trabalhos futuros	63
6.1.	Conclusões	63
6.2.	Trabalhos futuros	64
7.	Bibliografia e referências	65
	Anexo A: Verificação da sobreposição de dois efeitos luminosos	69
	Anexo B: Catálogos fornecidos pela Chatron com propriedades dos tubos de luz	73
	Anexo C: Simulação no Trnsys – Necessidades Térmicas de Aquecimento e Arrefecimento	89
	Anexo D: Repartição das diferentes componentes associadas ao consumo energético para as salas em estudo, sem e com tubos de luz.	91

Índice de figuras

Figura 1: Relação entre frequência e comprimento de onda. [2].....	4
Figura 2: Comportamento ondulatório da luz. [3]	5
Figura 3: Comportamento corpuscular da luz. [3]	5
Figura 4: Eficiências Energéticas para diferentes tipos de lâmpadas. [4]	6
Figura 5: Exemplificação do ângulo sólido. [3]	7
Figura 6: Diferença entre superfície aparente e superfície iluminada. [4]	7
Figura 7: Exemplificação do conceito iluminância. [3]	8
Figura 8: Abertura horizontal e oblíqua. [3].....	10
Figura 9: Diferentes configurações de sistemas convencionais para aproveitamento de luz natural. [2].....	13
Figura 10: Aplicação de palas horizontais e inclinadas num clerestório. [3].....	14
Figura 11: Variantes da aplicação de palas horizontais. [3].....	14
Figura 12: Sistema “anidolique”. [5]	15
Figura 13: Exemplo de parapeitos refletores. [3]	16
Figura 14: Estores refletores com lâminas com diferentes inclinações. [3].....	16
Figura 15: Exemplo de vidro direcionais. [3].....	16
Figura 16: Exemplo de tubo de luz vertical. [7]	17
Figura 17: Tubo de luz vertical não retilíneo. [8]	18
Figura 18: Esquema que demonstra a aplicação de LCP num tubo de luz horizontal. [9]	18
Figura 19: Cúpula prismática.	19
Figura 20: Cúpula esférica.	19
Figura 21: Helióstato. [11]	20
Figura 22: Difusores. [6]	21
Figura 23: Outros tipos de difusores. [13].....	21
Figura 24: Esquema do sistema coletor. [14]	22
Figura 25: Esquema da aplicação de tubos de luz horizontais. [14].....	23
Figura 26: Esquema do projeto Arthelio. [11].....	23
Figura 27: Esquema exemplificativo do sistema extrator com painéis triangulares de LCP. [9].....	24

Figura 28: Extratores - à esquerda, solução com prateleira horizontal circular, à direita, solução com anel de PMMA fluorescente. [9]	24
Figura 29: Esquema do funcionamento do software ADELIN. [19].....	27
Figura 30: Interface do DIALUX. [21].....	28
Figura 31: Esquema do funcionamento do software EnergyPlus. [26].....	31
Figura 32: Ilustração do posicionamento da sala no edifício. [28].....	35
Figura 33: Esquema das dimensões das diferentes salas em estudo.	37
Figura 34: Exemplo da distribuição das luminárias (sala 2).	38
Figura 35: Luminária TBH424 2xTL5-28W HFP C5-H GT da marca Philips.....	39
Figura 36: Malha de cálculo definida para a sala 2.	42
Figura 37: Esquema dos módulos utilizados na simulação no TRNSYS.	49
Figura 38: Consumo energético para os dias e salas em estudo sem a contribuição de tubos de luz.....	52
Figura 39: Consumo energético em iluminação artificial para os dias e salas em estudo com a contribuição de um tubo de luz	53
Figura 40: Poupança obtida em iluminação artificial com a instalação de um tubo de luz.	54
Figura 41: Comparação da redução entre a aplicação de um ou dois tubos de luz na sala 4 e 5.....	55
Figura 42: Redução anual do consumo energético em iluminação artificial obtida com a introdução de um tubo de luz.	56
Figura 43: Resultados obtidos com a introdução do segundo tubo de luz.	56
Figura 44: Energia consumida no sistema de climatização e iluminação artificial sem tubos de luz.....	57
Figura 45: Energia consumida no sistema de climatização e iluminação artificial com tubos de luz.....	58
Figura 46: Reduções das necessidades de arrefecimento e do consumo energético em iluminação artificial obtidas pela introdução de um tubo de luz.	59
Figura 47: Influência da introdução do segundo tubo de luz nas necessidades de arrefecimento.	60
Figura 48: Repartição da energia consumida na sala 1 sem tubos de luz.	61
Figura 49: Repartição da energia consumida na sala 1 com um tubo de luz.	61
Figura 50: Poupança energética no consumo global anual com a introdução de um tubo de luz.	62

Figura 51: Influência da introdução do segundo tubo de luz na energia global consumida.....	62
---	----

Índice de tabelas

Tabela 1: Diferentes iluminâncias para diferentes momentos do dia e noite. [3]	8
Tabela 2: Diferentes materiais e suas transmissividades. [2]	12
Tabela 3: Valor da profundidade de cada sala em estudo.	37
Tabela 4: Graus de reflexão utilizados na envolvente interior dos espaços em estudo. .	38
Tabela 5: Número de luminárias instaladas para cada sala.	39
Tabela 6: Distribuição de iluminância da sala 2 com três luminárias ligadas.	40
Tabela 7: Distribuição de iluminância da sala 2 com todas as luminárias ligadas.	40
Tabela 8: Valores de referência para a distância entre as várias superfícies e a “zona ocupada”. [31]	41
Tabela 9: Distribuição da iluminância da sala 2 proveniente apenas da janela no dia 21 de Julho com céu limpo às 10 horas.	42
Tabela 10: Distribuição da iluminância da sala 2 proveniente da janela e da luminária 4 no dia 21 de Julho com céu limpo às 10 horas.	43
Tabela 11: Distribuição da iluminância da sala 2 proveniente da janela e da luminária 3 e 4 no dia 21 de Julho com céu limpo às 10 horas.	43
Tabela 12: Perfil de iluminação artificial para o dia 21 de Julho com céu limpo.	44
Tabela 13: Perfil de iluminação artificial para o dia 21 de Dezembro com céu limpo. ...	44
Tabela 14: Propriedades dos componentes do tubo de luz utilizado.	45
Tabela 15: Posicionamento dos tubos de luz para as diferentes salas em estudo.	46
Tabela 16: Distribuição de iluminância proveniente da janela às 10h do dia 21 de Julho com céu limpo para a sala 2.	47
Tabela 17: Distribuição de iluminância proveniente do tubo de luz às 10h do dia 21 de Julho com céu limpo para a sala 2.	47
Tabela 18: Distribuição de iluminância resultante depois de somar os efeitos provenientes da janela e do tubo de luz.	47
Tabela 19: Perfil de iluminação artificial obtido no dia 21 de Julho com céu limpo para a sala 2.	48
Tabela 20: Perfil de iluminação artificial obtido no dia 21 de Dezembro com céu limpo para a sala 2.	48
Tabela 21: Verificação da sobreposição da iluminação proveniente de uma janela vertical e uma horizontal.	69
Tabela 22: Verificação da sobreposição da iluminação proveniente de duas luminárias em duas posições diferentes.	70

Tabela 23: Distribuição de iluminância do tubo de luz 1.....	70
Tabela 24: Distribuição de iluminância do tubo de luz 2.....	71
Tabela 25: Soma das distribuições de iluminância do tubo de luz 1 com o tubo de luz 2.	71
Tabela 26: Distribuição da iluminância do tubo de luz 1 e 2 em simultâneo.....	71
Tabela 27: Diferença, em percentagem, entre as tabelas 24 e 25.	72
Tabela 28: Perfil de Ocupação [33]	89
Tabela 29: Perfil de Equipamentos [33].....	90
Tabela 30: Densidade de Equipamentos e Ocupação [33].....	90

1. Introdução

1.1. Enquadramento e objetivos do trabalho

Apesar da conjuntura atual, crise económica e financeira, e o fato de haver uma clara tendência para o consumo energético aumentar, subsiste uma necessidade crescente em encontrar soluções que possibilitem combater estas preocupações. O recurso a fontes de energia renovável tem ganho popularidade, o que tem permitido uma melhoria na eficiência energética, para além da redução de emissão de gases de efeito estufa.

Das mais variadas utilizações de energia associadas a edifícios dos diversos setores, a iluminação, natural ou artificial, está intrinsecamente ligada ao nosso quotidiano, sendo portanto um assunto que merece todo o cuidado no que toca a medidas de poupança de energia.

O uso excessivo de iluminação artificial pode levar a efeitos indesejados tanto para os ocupantes de um edifício como no consumo exagerado de energia. Como exemplo, refere-se que no ano 2000, a energia gasta na iluminação doméstica era cerca de 13% do consumo total da energia elétrica, correspondendo a 6,5 milhões de toneladas de petróleo equivalente. Já no sector industrial esse valor é ainda mais elevado, cerca de 47 milhões de toneladas de petróleo equivalente. [1]

É óbvio a necessidade de luz elétrica durante a noite, todavia, durante o dia essa é frequentemente desperdiçada devido ao mau aproveitamento da luz solar. Esse é resultante da má gestão da mesma aquando da projeção dos edifícios, que muitas das vezes não leva em conta a diferentes fatores, como por exemplo, uma adequada colocação de janelas. [1]

Dito isto, é imperativo que se comece a aplicar novas formas de aproveitamento da energia solar para a iluminação de interiores dos edifícios, durante o dia, poupando-se assim os recursos inerentes à produção de energia elétrica, para além de se suavizar o impacto ambiental que a exploração daqueles acarreta.

Este trabalho tem como objetivo abordar as formas e sistemas de aproveitamento de luz solar já existentes, como também as ainda pouco conhecidas, das quais se destaca o dispositivo denominando tubo de luz.

Assim, pretende-se verificar e quantificar a redução do consumo energético com a introdução de tubos de luz, não só associada à iluminação artificial, bem como na sua influência indireta em sistemas de climatização e no consumo global num espaço do tipo escritório.

1.2. Estrutura do trabalho e Temas Abordados

O presente relatório encontra-se dividido em cinco capítulos principais, sendo que este, capítulo um, faz uma breve abordagem às características e propriedades da luz, como também apresenta um resumo dos fatores de influência e dos sistemas convencionais e não-convencionais no aproveitamento natural da mesma.

O segundo capítulo foca-se no dispositivo em estudo neste trabalho (tubo de luz), explicando as suas diferentes configurações e descrição dos componentes associados.

No terceiro capítulo são apresentados vários modelos de simulação dinâmica, nomeadamente no que diz respeito a simuladores de iluminação natural e artificial, iluminação natural de tubos de luz e de necessidades energéticas. Ainda neste capítulo, é proposto e validado um modelo de sobreposição de várias fontes luminosas.

O capítulo quatro trata do caso de estudo desta dissertação, onde este é caracterizado e descrito o método de cálculo dos diferentes consumos de energia em análise.

Por fim, o capítulo cinco faz a análise dos consumos energéticos com e sem a contribuição luminosa de tubos de luz, salientando e quantificando a poupança inerente à utilização dos mesmos.

1.3. Luz

Tratando-se de um tema não integrante de nenhuma unidade curricular do curso onde este trabalho está inserido, efetuou-se um estudo sobre a luz com o objetivo de perceber melhor como esta se comporta e se caracteriza.

Desta forma, apresenta-se de seguida uma breve descrição das teorias que foram sendo propostas ao longo do tempo, como também as grandezas que estão relacionadas.

1.3.1. O fenómeno

Segundo a “Sociedade Norte-americana de Engenharia da Iluminação” (IESNA), no âmbito na Engenharia da Iluminação, o termo “luz” é definido como uma forma de energia radiante que é capaz de excitar a retina do olho humano e criar a sensação de visão. Fisicamente, a luz é caracterizada por ser uma onda eletromagnética com comprimentos de onda entre 380 e 780 nm do espectro eletromagnético.

Ao longo dos anos foram propostas várias teorias para descrever a luz. Uma das primeiras envolvia a noção de que a luz era emitida pelos olhos, criando a sensação de visão quando estes eram atingidos por essas mesmas emissões. Esta teoria foi rejeitada rapidamente por Aristoteles ao questionar o porquê de não conseguir ver no escuro.

Assim, seguem algumas das teorias que foram surgindo, havendo, na generalidade, um consenso entre elas: do ponto de vista físico, a luz era considerada como uma transferência de energia de um local para outro. [2]

Teoria Corpuscular [2]

Esta teoria, defendida por Isaac Newton (1642-1727), definia que a luz tinha um aspeto corpuscular dada a observação de movimento de partículas. Baseava-se nos seguintes princípios:

- corpos luminosos emitem radiação em forma de partículas;
- as partículas tem trajetórias retilíneas;
- as partículas ao chegarem à retina, estimulam uma resposta correspondente à visão.

Teoria Ondulatória [2]

A teoria ondulatória, proposta por Christiaan Huygens (1629-1695), foi fundamentada no fato da observação das ondas poderem transferir energia num meio que não se propaga, era baseada nas seguintes premissas:

- a luz resulta da vibração molecular do material luminoso;
- essa vibração era transmitida por movimentos ondulatórios;
- as vibrações atuam na retina dando a sensação de visão.

Teoria Eletromagnética [2]

Sugerida por James Clerk Maxwell (1831-1879). Esta teoria defendia que os corpos luminosos emitiam a luz na forma de energia radiante que se propagava por ondas eletromagnéticas. Estas ondas eletromagnéticas, à semelhança das anteriores teorias, originavam a sensação de visão ao contactarem com a retina.

Teoria Quântica [2]

Proposta por Max Planck, trata-se de uma atualização da teoria corpuscular, onde afirmava que a energia era emitida e absorvida de forma descontínua. [2]

A emissão de energia acontece quando um eletrão de um átomo passa de um nível superior para um inferior. Essa energia é caracterizada por ser proporcional à frequência da vibração de um fóton:

$$E_n = h \times \nu$$

- em que E_n é a energia em Joules, ν a frequência em Hz e h igual à constante de Planck com o valor de $6,626 \times 10^{-34}$ J.s. [2][3]

Teoria Unificada

Proposta por Louis de Broglie e Werner Heisenberg, tem por base as duas seguintes premissas:

1. Cada corpo tem associado ao seu movimento uma onda cujo seu comprimento é dado pela seguinte expressão:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

- em que λ é o comprimento de onda, h é a constante de Planck, m , a massa e v é a velocidade do corpo;

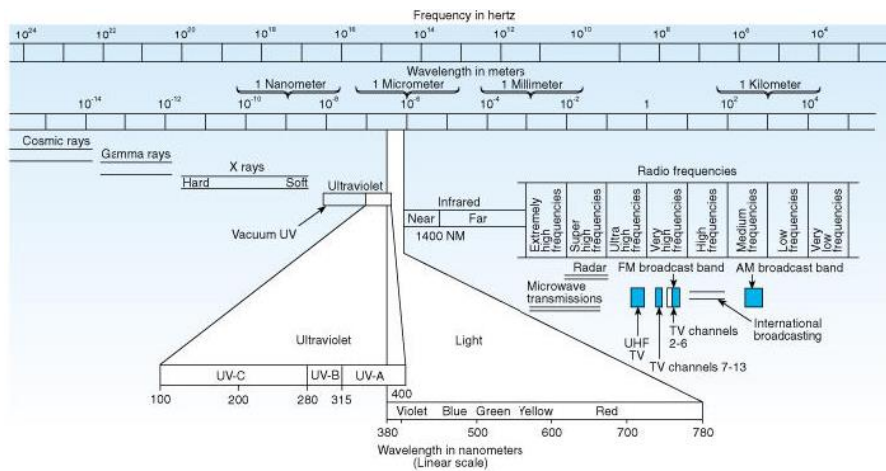


Figura 1: Relação entre frequência e comprimento de onda. [2]

2. Não é possível determinar, simultaneamente, todas as propriedades que são distintas entre os comportamentos ondulatório e corpuscular. [2]

Na atualidade, a física moderna reconhece a luz como radiação eletromagnética com as duas características: corpuscular e ondulatória. [3]

O aspeto ondulatório é caracterizado por uma onda sinusoidal, definida pelo seu comprimento de onda (λ) em nm, período (T) em segundos e frequência (ν) em Hz. Estas propriedades estão relacionadas entre elas e a velocidade da luz ($c = 300000 \text{ km/s}$) como se mostra na figura 2.

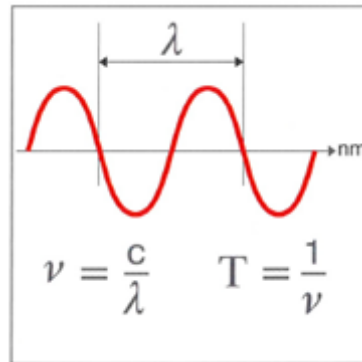


Figura 2: Comportamento ondulatório da luz. [3]

O aspeto corpuscular é definido pela radiação composta por partículas: os fótons. Esta teoria, à qual já se fez referência, e que se encontra demonstrada na expressão antecedente que relaciona a energia e frequência com a constante de Planck, encontra-se apresentada de forma resumida na figura 3:

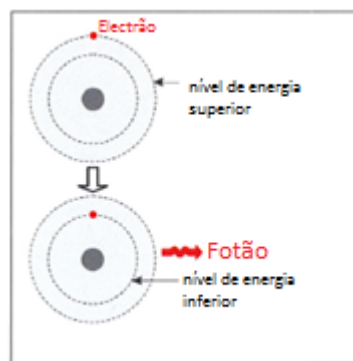


Figura 3: Comportamento corpuscular da luz. [3]

A luz, quer seja considerada onda ou fóton, é sempre energia na forma de radiação. [3]

1.3.2. Grandezas Luminosas

Neste subcapítulo, apresentam-se as grandezas associadas ao estudo da luz: fluxo luminoso, intensidade luminosa, luminância e iluminância.

Fluxo luminoso

O fluxo luminoso (ϕ) representa a quantidade de energia radiante emitida por uma fonte luminosa num certo espaço que seja capaz de sensibilizar o olho humano. Expressa-se em lúmen (lm) – 1/680 W emitidos no comprimento de onda de 555 nm. A expressão para calcular esta grandeza luminosa é a seguinte:

$$\phi = 680 \int S(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

- sendo que :

- $S(\lambda)$ representa o fluxo de energia (W) para um certo comprimento de onda;

- $V(\lambda)$ define a sensibilidade relativa do olho humano para um certo comprimento de onda;

Para aferir quantos lumens são emitidos por uma fonte luminosa, é preciso medi-la nas direções onde se deseja obter essa informação, porque a fonte luminosa quase nunca irradia luz uniformemente em todas as direções.

O conceito, eficiência energética (η), surge quando houve a necessidade de comparar diferentes fontes luminosas. Esta determina-se a partir do quociente entre o fluxo luminoso e a potência elétrica (P), ou seja: [3]

$$\eta = \frac{\phi}{P}$$

A figura 4 apresenta várias eficiências energéticas para diferentes tipos de lâmpadas.

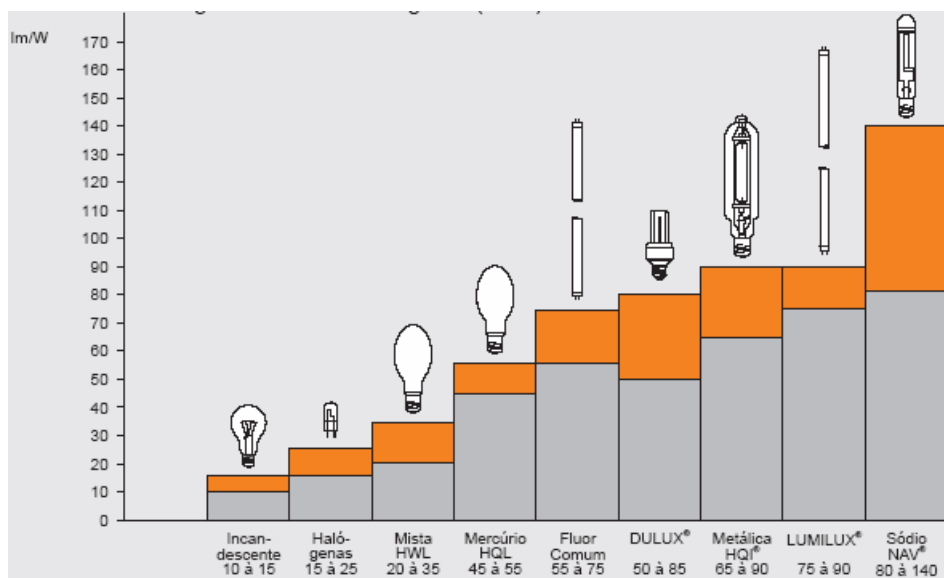


Figura 4: Eficiências Energéticas para diferentes tipos de lâmpadas. [4]

Intensidade luminosa

Intensidade luminosa (I) define-se por ser igual ao fluxo luminoso numa dada direção expressando-se em candelas (cd). É calculada pelo quociente entre o fluxo luminoso e o ângulo sólido (Ω), sendo a unidade do último um esferorradiano (sr).

$$I = \frac{\phi}{\Omega}$$

Um esferorradiano é o ângulo sólido que corta uma superfície igual a 1 metro quadrado numa esfera de 1 metro de raio. O ângulo sólido calcula-se dividindo a área da superfície pelo raio segundo a seguinte expressão:

$$\Omega = \frac{S}{r^2}$$

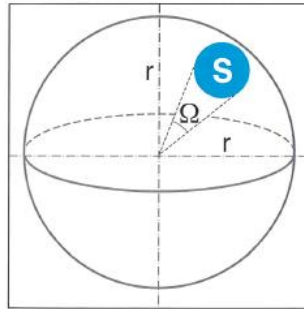


Figura 5: Exemplificação do ângulo sólido. [3]

Como normalmente as fontes luminosas são anisotrópicas, utiliza-se o termo intensidade luminosa média, ou seja:

$$I = \frac{\phi}{4\pi}$$

Onde o termo “ 4π ” é igual ao ângulo sólido para uma esfera. [3]

Luminância

A luminância (L) de uma superfície numa certa direção caracteriza-se pela razão entre a intensidade luminosa e a superfície aparente para o observador. A sua unidade é candela por metro quadrado (cd/m^2).

$$L = \frac{I}{S \cos \alpha}$$

Esta grandeza tem o seu valor máximo quando o olho está direcionado com a normal da superfície luminosa. Pode ser direta ou indireta: direta quando se trata de superfícies iluminantes e indireta no caso de superfícies iluminadas. [2] [3]

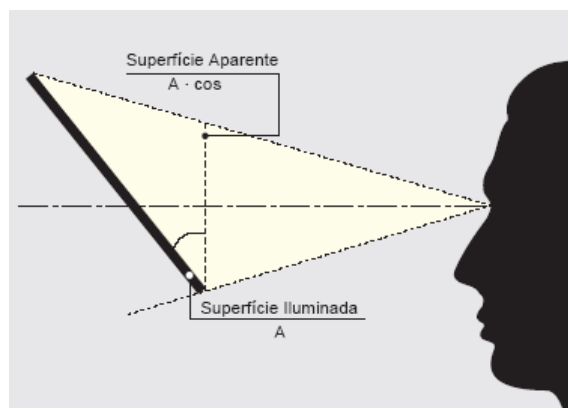


Figura 6: Diferença entre superfície aparente e superfície iluminada. [4]

É a luminância que produz a sensação de claridade ou brilho que o olho humano recebe de uma superfície. [3]

Iluminância

A iluminância (E) é definida pela razão entre o fluxo luminoso emitido por uma fonte luminosa e a superfície iluminada a uma certa distância (d). A sua unidade é o lux (lx).

$$E = \frac{\phi}{S} = \frac{I}{d^2} \cos \alpha$$

Esta caracteriza a quantidade de luz recebida numa superfície, avaliando as diferenças de iluminação num espaço. No entanto, esta quantidade é muito difícil de quantificar pela vista humana. [3]

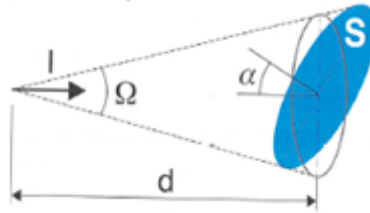


Figura 7: Exemplificação do conceito iluminância. [3]

Para melhor se entender esta grandeza, apresenta-se a tabela 1 com alguns valores de iluminâncias.

Tabela 1: Diferentes iluminâncias para diferentes momentos do dia e noite. [3]

Fonte Luminosa	Iluminância [lx]
De noite com lua cheia	0.2
De dia com céu encoberto	5 000-20 000
De dia com céu limpo (sem Sol)	7 000-24 000
De dia com céu limpo (com Sol)	100 000

1.4. Aproveitamento da luz natural

Atualmente existem inúmeros sistemas que permitem aumentar a capacidade de captação de luz natural em edifícios, como os sistemas convencionais há muitos anos utilizados, como por exemplo janelas e claraboias. Estes estão diretamente ligados à arquitetura do edifício, devendo ser previstos na conceção do design na projeção do mesmo, tem como estratégia central a forma de captação e distribuição da luz natural.

1.4.1. Fatores de influência no aproveitamento da luz natural

A quantidade de luz natural que é possível captar depende da variação de diversos fatores. Estes fatores, de seguida descritos, têm de ser muito bem compreendidos pelos projetistas no

momento da concepção de qualquer edifício. São eles que vão determinar o nível de conforto dos seus ocupantes, não só no aspeto luminoso como também térmico.

Tipo de céu [3]

A luz natural é totalmente dependente das condições climáticas (do tipo de céu) que existe em cada momento, já que podemos ter radiação direta e difusa ou apenas difusa.

A radiação direta é a que proporciona um fluxo mais intenso tendo a vantagem de poder ser concentrada ou redirecionada para um determinado fim. Em contrapartida, esta provoca o aumento dos ganhos térmicos e, consequentemente, um maior consumo energético em sistemas AVAC, para além de ser uma fonte de brilho excessivo que pode provocar desconforto nos ocupantes de um edifício. Todavia, há sempre a possibilidade de obviar tais problemas prevendo-se a orientação e posição das aberturas na concepção do edifício como também o uso de proteções solares.

A radiação difusa está disponível em todas as direções e não provoca problemas de brilho nem de aquecimento no interior do edifício, apesar da sua intensidade ser relativamente baixa e não ser muitas vezes suficiente.

Altura do ano [3]

A luz solar que entra num de um edifício depende da estação do ano, já que a altura do Sol e a iluminância varia de acordo com cada uma delas.

Para uma fachada virada a Sul, a iluminância no Verão é maior mas, devido à posição alta em que se encontra o Sol, a luz solar não consegue penetrar e iluminar locais afastados da abertura. No Inverno, a altura do Sol é mais baixa, permitindo a entrada dos raios solares com maior profundidade, iluminando espaços mais afastados, apesar da menor iluminância que apresenta.

Conclui-se assim que apesar de a iluminância reduzir do Verão para o Inverno, devido à alteração da posição do Sol, os raios solares vão atingindo zonas mais profundas.

Hora do dia [3]

Ao longo de um dia, devido ao movimento de rotação da Terra, a luz solar disponível modifica-se de acordo com as diferentes alturas que o Sol atinge desde o nascer-do-sol ao pôr-do-sol.

Na estação de Verão, atento a que a altura máxima do sol acontece às 12 horas solares, constata-se que, desde o nascer-do-sol até ao meio-dia solar, a luminância aumenta em oposição à capacidade de iluminar zonas profundas, que diminui, sucedendo o inverso na progressão do Sol até ao seu ocaso.

De notar que apesar da profundidade iluminada diminuir até ao meio dia solar, conforme atrás se afirmou, essa perda é compensada com o aumento da iluminância.

Orientação da abertura [3]

A organização espacial das aberturas tem necessariamente que ser feita na projeção do edifício pois estas devem ser pensadas em função do tipo de atividade que será desempenhada pelos ocupantes. Por exemplo, é preferível que uma cozinha seja colocada com a sua fachada

virada a Este para que, quando utilizada, haja maior aproveitamento da luz solar possível, evitando-se o consumo de energia em iluminação artificial.

No inverno, a orientação onde se consegue captar o máximo de luz solar é a Sul. Por outro lado, no Verão, a radiação solar é maior a Este durante a manhã e a Oeste durante a tarde. Contudo, Sul é a orientação que nos dá o melhor aproveitamento solar durante o ano todo, pelo que, preferencialmente será esta a orientação escolhida para os locais do edifício onde se desempenhe uma atividade diurna.

O estudo da orientação das aberturas de um edifício deverá também ter em linha de conta o equilíbrio térmico. Uma abertura a Sul, dada a exposição ao Sol durante a maior parte do dia, é uma fonte de ganhos térmicos, ao contrário de uma abertura a Norte, onde existem perdas. Estes balanços têm de ser estimados por forma a tornar o edifício energeticamente eficiente, introduzindo-se sistemas de climatização adequados tendo em conta o conforto dos ocupantes.

Inclinação da abertura [3]

A captação máxima da luz solar acontece quando a radiação solar faz um ângulo de 90° com a abertura. Como já foi dito, o “tipo de céu” influencia bastante a luminância obtida num espaço.

Quando o céu está encoberto, o único fator que influencia a quantidade de luz captada é a área da abertura que consegue “ver” o céu. Desta forma, depreende-se que uma abertura horizontal acaba por ser a melhor forma de captar a radiação difusa quando temos o céu encoberto. Neste tipo de abertura, temos maior aproveitamento no Verão que no Inverno, sendo necessário ter cuidado com os ganhos térmicos no primeiro caso.

As aberturas verticais quando o céu está encoberto têm como pontos fracos, o fato de serem pouco favoráveis à captação da luz difusa, para além de possibilitarem, junto à abertura, a criação de situações de brilho intenso. Por outro lado, são as que conseguem captar o máximo de radiação solar a Sul no Inverno, embora no Verão existam limitações na profundidade de penetração.

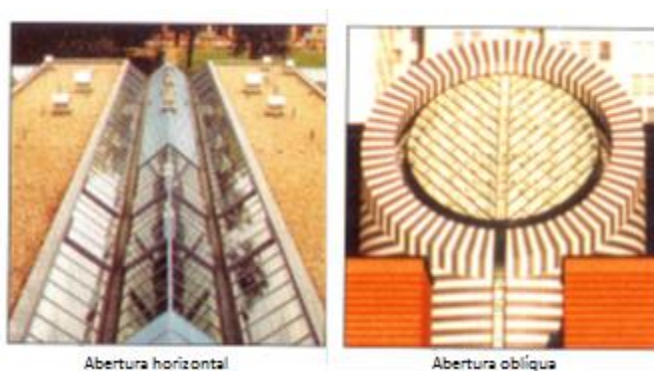


Figura 8: Abertura horizontal e oblíqua. [3]

Forma, dimensão da abertura e sua posição do edifício [3]

Num edifício, as características das suas aberturas afetam diretamente o conforto visual dos seus ocupantes, e o equilíbrio térmico do próprio edifício. Assim, é necessário chegar a um

ponto ideal onde haja o compromisso entre a quantidade de luz suficiente (que não seja desconfortável) e as perdas ou ganhos térmicos no Inverno e no Verão, respetivamente.

As dimensões de uma abertura influenciam a quantidade de luz que entra num espaço de um edifício. Quanto maior for, maior é a capacidade de aproveitamento da luz natural.

A forma da abertura vai condicionar a distribuição da luz no interior de um espaço. Ao variar a largura da abertura, a uniformidade da repartição da luz varia apesar da luminosidade média ser praticamente constante. A variação da altura da abertura influencia a profundidade que a luz consegue alcançar.

A posição da abertura também tem um papel importante na distribuição da luz e no controlo do conforto visual dos seus ocupantes. Quanto mais alta for a sua posição, maior a profundidade de alcance embora, na proximidade da abertura, se crie uma zona de sombra. Ao mesmo tempo, estando a abertura numa posição mais alta, a probabilidade de ocorrência de encadeamento direto na zona de trabalho devido ao brilho é mais reduzida. O posicionamento vai depender muito da zona e da altura do posto trabalho dos ocupantes.

Uma das melhores combinações será haver uma abertura na zona superior da fachada e uma outra central, equipada de proteção solar. Assim, obtém-se luz uniforme em profundidade, controlo do brilho, e, quando a luz for insuficiente perto da abertura, haverá a possibilidade de regular a proteção solar, deixando entrar apenas a quantidade de luz que é necessária.

Material de transmissão [2][3]

A quantidade e qualidade de luz natural que penetra dentro de um espaço são muito influenciáveis pelo tipo de material de transmissão utilizado. As trocas de calor entre o exterior e interior estão também dependentes do material escolhido. Assim, as três propriedades mais importantes são:

- transmissividade luminosa ou transparência
- fator solar
- coeficiente de condução térmica

A transmissividade luminosa de um material é a fração de luz incidente que irá atravessar o material, cuja percentagem será igual à transparência do material em causa. Assim, quanto maior for a transparência de um material, maior será a quantidade de luz que penetrará no espaço interior.

O fator solar é a relação entre a energia solar que é transmitida através de um material e a radiação solar incidente na direção normal a este. Este fator será escolhido tendo em conta a zona onde se encontra o edifício. Em zonas quentes é preferível um fator solar baixo para não haver grandes ganhos térmicos através das aberturas dos edifícios; em zonas frias é exatamente o oposto.

O coeficiente de condução térmica de um material quantifica a quantidade de calor transferida por condução através dele. Quanto menor for este coeficiente, melhor isolante é o material.

Os principais materiais utilizados para esta aplicação são o vidro e plástico. Para cada um existe uma grande variedade de subtipos com diferentes propriedades. Na tabela 2 pode-se ver algumas dessas variantes relativamente à transmissividade:

Tabela 2: Diferentes materiais e suas transmissividades. [2]

Material	Approximate Transmittance (percent)
Polished Plate/Float Glass	80–90
Sheet Glass	85–91
Heat Absorbing Plate Glass	70–80
Heat Absorbing Sheet Glass	70–85
Tinted Polished Plate	40–50
Figure Glass	70–90
Corrugated Glass	80–85
Glass Block	60–80
Clear Plastic Sheet	80–92
Tinted Plastic Sheet	42–90
Colorless Patterned Plastic	80–90
White Translucent Plastic	10–80
Glass Fiber Reinforced Plastic	5–80
Translucent Sandwich Panels	2–67
Double Glazed-2 Lights Clear Glass	77
Tinted Plus Clear	37–45
Reflective Glass*	5–60

*Includes single glass, double glazed units, and laminated assemblies. Consult manufacturer's material for specific values.

Nos vidros, para diminuir o seu coeficiente de condução térmica pode-se aumentar o número de camadas (vidro duplo, triplo), substituir o ar por outro gás mais isolante ou atuar na sua superfície alterando a sua emissividade.

1.4.2. Sistemas convencionais

Os sistemas convencionais, como o próprio nome indica, são sistemas amplamente utilizados e conhecidos há muito tempo. Basicamente são aberturas na fachada exterior que, normalmente, utilizam vidro como material de transmissão e que apenas se diferenciam pelo tamanho e posicionamento no edifício.

Existem assim, aberturas das mais variadas configurações, a saber:

Abertura lateral: esta configuração leva a uma contínua entrada de luz natural, sendo normalmente posicionada na zona superior da fachada para se obter uma iluminância contante. Para não haver grandes variações de iluminância num espaço durante um dia, é usual que a distância entre a janela e a parede oposta a esta seja no máximo o dobro da altura da parte superior da janela – é por esta razão que habitualmente se coloca a janela perto do teto, embora o brilho aumente (vê-se mais céu), na zona de trabalho este continua a um nível confortável para os ocupantes. [2]

Abertura lateral com pala horizontal (a): as palas são utilizadas para reduzir a penetração da luz solar em latitudes em que o sol está na sua posição mais alta durante a utilização do

espaço. A utilização das palas reduz a penetração da luz, todavia contribuem positivamente para que a iluminância se mantenha constante ao longo do dia.

Abertura bilateral (b): a utilização de duas aberturas tem a vantagem de se poder duplicar a profundidade de um espaço. Muitas vezes, a segunda janela, existe apenas na zona superior sendo suficiente para se ter uma iluminância satisfatória, reduzindo ao mesmo tempo perdas/ganhos térmicos

Abertura uni/bilateral no teto (c): este sistema é normalmente utilizado em edifícios de indústria onde necessitam de luz numa zona mais central. É frequente utilizarem materiais altamente refletores por baixo das aberturas para distribuir melhor a luz natural.

Clerestórios (d): este tipo de abertura é utilizado para aumentar a profundidade de penetração da luz natural estando normalmente virados na mesma orientação das aberturas laterais.

Aberturas em “dentes de serra” (e): uma configuração também muito utilizada em edifícios industriais de grandes dimensões. Esta permite que haja um grande aproveitamento da luz natural, embora aumente o risco de ocorrência de grandes ganhos térmicos no Verão. [2]

Claraboias (f): este tipo de dispositivo pode tomar muitas formas diferentes – por exemplo cúpulas ou painéis em fibra de vidro. São utilizadas para levar luz natural a zonas interiores que não são possíveis de iluminar com aberturas laterais. Na aplicação destes sistemas têm-se de ter em conta o isolamento, pois, caso contrário, podem originar infiltrações e ao gotejamento devido a condensação não desejadas. Existem modelos que permitem fazer ventilação e refrigeração do espaço a que pertencem. Normalmente são de cor branco fusco para haja uma distribuição uniforme da luz sem ocorrerem problemas de brilho.

Átrios (g): nestas zonas dos edifícios, as aberturas no teto podem ter formas piramidais ou de grandes cúpulas que permitem um grande aproveitamento da luz natural. Como estes dispositivos tem grandes áreas, utilizam-se materiais com transmissividade baixa (10-25%) para não haver brilho excessivo dentro destes edifícios. Normalmente, usam-se painéis translúcidos de fibra de vidro de alta difusão que são adequados para o aproveitamento da luz natural difusa, mesmo sob sol direto. [2]

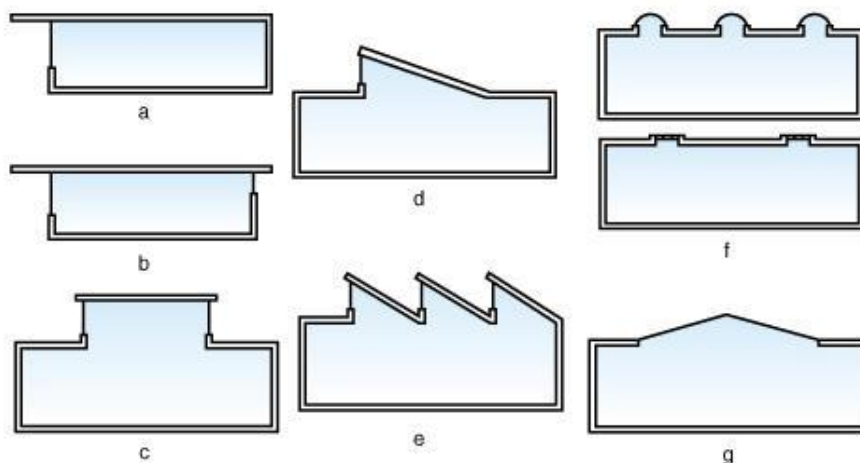


Figura 9: Diferentes configurações de sistemas convencionais para aproveitamento de luz natural. [2]

Existem ainda muitas outras combinações para além das suprarreferidas, com as mais variadas proteções solares. Estas proteções, normalmente com possibilidade de ajuste, ajudam a corrigir problemas associados ao aumento do brilho em determinados momentos do dia, mantendo o conforto visual aos seus ocupantes. [2]

1.4.3. Sistemas não-convencionais

Existem hoje em dia, alguns sistemas de captação de luz natural que a captam de forma mais eficiente que os usuais, porém, dada a sua complexidade de aplicação, não são muito utilizados. Estes sistemas podem ser pequenas adaptações a sistemas já conhecidos ou até , novos conceitos, com estruturas completamente diferentes dos habituais.

Palas horizontais e inclinadas combinadas com clerestório [3]

Uma das aplicações mais usadas, como já se referiu, são as palas horizontais. Fazendo um estudo mais pormenorizado do local onde se situa o edifício e da variação da posição do Sol durante o ano, pode-se dimensionar e aplicar um sistema de palas que consiga redirecionar a luz natural para o teto para que não haja incidência direta do Sol nos ocupantes. Estas palas podem ter muitas variantes: horizontais, inclinadas, planas ou curvas, situadas no interior e/ou exterior da janela quando combinadas com um clerestório.



Figura 10: Aplicação de palas horizontais e inclinadas num clerestório. [3]



Figura 11: Variantes da aplicação de palas horizontais. [3]

Quando bem dimensionadas, permitem diminuir consideravelmente os ganhos térmicos no Verão, minimizando o risco de brilho intenso, mantendo, ainda assim, o conforto visual dos seus ocupantes.

A superfície da pala deve ser a mais refletora possível. Pode ser mate, brilhante ou especular, sendo este último a melhor opção por ser a mais refletora. O grau de especularidade do teto

também tem uma grande importância nesta aplicação. Quanto mais refletor for o teto maior será o aproveitamento da luz natural refletida na sala. A cor e o declive do teto também têm um papel importante na distribuição e na profundidade de alcance da luz.

Sistemas “anidoliques” [3]

Os sistemas “anidoliques” utilizam espelhos curvos (parabólicos ou elípticos) para captar a luz natural e levá-la para zona profundas de uma sala. São projetados para fazerem o aproveitamento da luz difusa do céu. Quando há incidência de luz direta, existem proteções solares que previnem o aparecimento de brilho intenso. Aqui, as propriedades do teto também tem um papel fundamental na distribuição da luz – quanto mais refletor for mais eficiente é o aproveitamento luminoso.

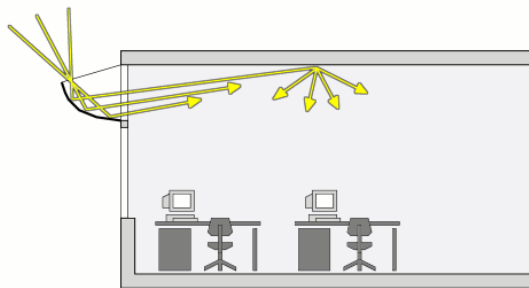


Figura 12: Sistema “anidolique”. [5]

Condutas solares [3]

Estes dispositivos permitem transmitir a radiação direta do Sol para o interior de um edifício. A transmissão pode ser feita por espelhos, lentes, fibras óticas, prismas refletores, cabos em acrílico, ou condutas ocas com as faces interiores refletoras – tubo de luz. Sobre este último se falará com mais pormenor no capítulo respetivo.

Os raios luminosos podem ser encaminhados para uma determinada superfície ou então difundida num certo espaço, obtendo-se uma distribuição mais homogênea embora menos intensa.

Parapeitos das janelas refletores [3]

A utilização de materiais refletores nos parapeitos das janelas permite que os raios solares que os incidem sejam aproveitados ao refleti-los para o interior do espaço. Estes podem ser aplicados com inclinações diferentes, consoante o trajeto que o Sol faz relativamente à janela, podendo assim refletir o máximo de luz possível.

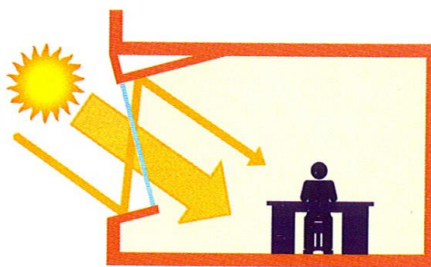


Figura 13: Exemplo de parapeitos refletores. [3]

Estores refletores [3]

Funcionam segundo o mesmo princípio que os parapeitos refletores. Ao usar materiais refletores nos estores, estes redirecionam os raios solares para o teto, espalhando a luz o mais uniforme possível. A inclinação das lâminas dos estores pode variar conforme a posição do Sol, maximizando-se o aproveitamento da luz natural. Existe, ainda, a possibilidade de combinar várias inclinações das lâminas para o mesmo momento, permitindo sombrear e iluminar zonas diferentes do espaço.

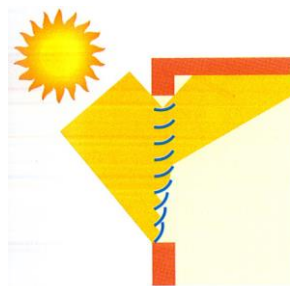


Figura 14: Estores refletores com lâminas com diferentes inclinações. [3]

Vidros direcionais [3]

Hoje em dia, já existem vidros disponíveis no mercado que permitem alterar a trajetória dos raios solares quando estes os atingem. Normalmente, estão configurados para os direcionar para o teto, mais uma vez, com objetivo de levar a luz para as zonas mais profundas.

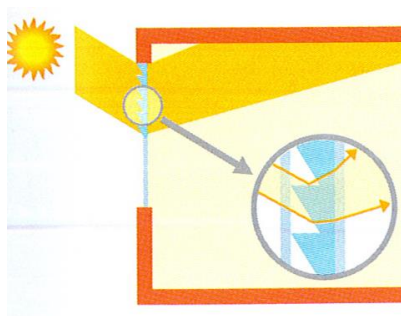


Figura 15: Exemplo de vidro direcionais. [3]

2. Tubos de luz

Neste capítulo aborda-se com maior detalhe o dispositivo central de estudo deste trabalho. Serão caracterizados os seus diferentes componentes e apresentados alguns exemplos da sua aplicação.

2.1. Componentes

Os tubos de luz são dispositivos que permitem levar a luz natural para espaços interiores onde esta não é capaz de alcançar, como zonas distantes de janelas ou claraboias, ou até mesmo espaços sem qualquer abertura para o exterior.

Conforme referido, a quantidade de luz natural existente num certo lugar é um fator importante para qualidade e conforto visual do ser humano. Quando este conforto não é conseguido, provoca frequentemente, no ser humano, alterações comportamentais que não são de todo desejáveis. Por isso é relevante conseguir-se obter um maior proveito desta fonte de luz, não só pelo ponto de vista humano, como também na ótica da redução do consumo de energia associada a iluminação artificial. [6]

Na sua forma genérica, um tubo de luz é constituído por um dispositivo de captura de luz – elemento coletor -, uma conduta refletora que transporta a luz para o interior de um edifício – o tubo propriamente dito-, e um difusor, tal como sugere é o elemento que difunde a luz uniformemente pela zona a iluminar. [6]

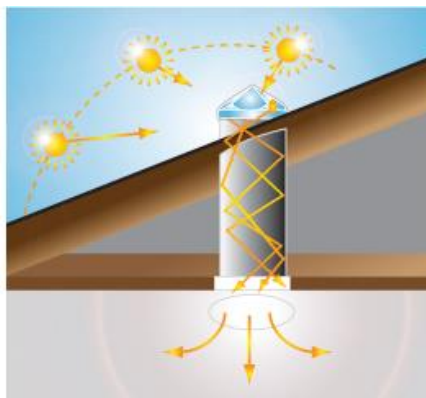


Figura 16: Exemplo de tubo de luz vertical. [7]

De uma forma geral, pode-se apresentar dois tipos de tubos de luz: horizontais e verticais. [2] No entanto, nem sempre é possível a aplicação de tubos completamente verticais, nomeadamente, em telhados inclinados (figura 17), que são considerados verticais apesar de conterem pequenas inclinações. Nesta situação, uma solução comum é colocar-se uma curva numa zona intermédia do tubo, ficando a sua parte superior orientada segundo a inclinação do telhado (figura 17). [8]

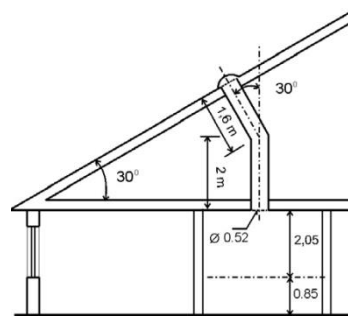


Figura 17: Tubo de luz vertical não retilíneo. [8]

2.1.1. Elemento coletor

Existem atualmente vários tipos de sistemas e geometrias de coletores tanto para tubos verticais como para horizontais.

Nos tubos horizontais existem por norma sistemas deflectores para redirecionar a luz para o interior da conduta. Exemplo disso é a utilização de “Laser Cut Panels” (LCP) - estes permitem deflectir os raios de grande altura solar dando-lhes a direção do eixo da conduta. Assim, o número de reflexões na parede da conduta será menor, reduzindo as perdas de intensidade, logo com uma maior eficiência no aproveitamento da luz natural. [9]

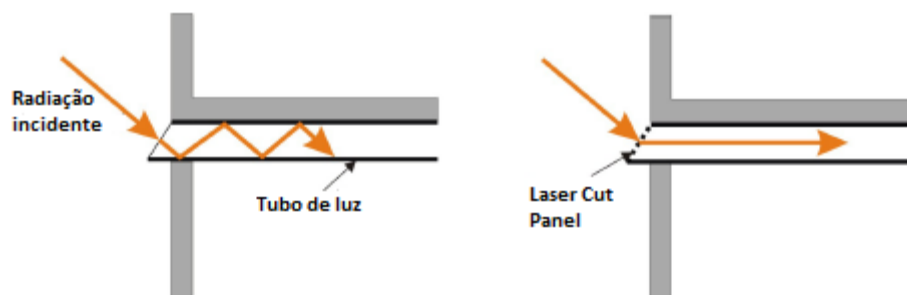


Figura 18: Esquema que demonstra a aplicação de LCP num tubo de luz horizontal. [9]

Os LCP são fabricados em acrílico transparente aos quais são aplicados cortes paralelos com laser; cada corte torna-se num espelho deflector de radiação perpendicular ao painel, como se mostra na figura acima. [9]

Nos tubos verticais normalmente utilizam-se cúpulas: esféricas ou prismáticas. Estas são normalmente feitas com materiais muito transparentes para deixarem passar a maior quantidade de luz possível. [10] A maior parte destas cúpulas são construídas em acrílico, mas também existem algumas em policarbonato – embora seja cerca de 10% menos transparente, é bastante mais resistente que o acrílico. Esta característica é importante, pois, estando a cúpula no exterior, confere-lhe maior resistência às diferentes condições atmosféricas (chuva, sol e poeiras). [6]

A diferença entre os dois tipos de cúpula está na eficiência de captação de luz natural para diferentes alturas solares. As prismáticas, tendo o mesmo princípio de funcionamento que os LCP - redirecionar os raios solares de ângulos de incidência baixos e médios -, são mais eficientes durante a manhã e o final da tarde. As esféricas têm o comportamento contrário, são mais eficientes a meio do dia, quando o Sol se encontra a alturas solares elevadas onde os raios solares não necessitem de serem redirecionados. [9][6]



Figura 19: Cúpula prismática.



Figura 20: Cúpula esférica.

Existem um outro tipo de coletor que utiliza helióstatos para redirecionar a luz solar para o interior do tubo. Este helióstato é constituído por dois espelhos refletores. O primeiro, acionado por um sistema mecânico, é orientado segundo o ângulo azimuth do Sol. Este concentra e reflete a luz solar para o segundo refletor. O segundo refletor tem como fim redirecionar a luz segundo o eixo da conduta refletora. [11]



Figura 21: Helióstato. [11]

2.1.2. Conduta refletora

A conduta refletora, ou o tubo propriamente dito, existe na forma circular ou quadrangular. Estas são feitas num material refletor por forma a não se perder a intensidade dos raios solares que atingem a superfície interna do tubo.

Nas condutas refletoras pode-se distinguir duas variantes: uma que se foca apenas em transportar a luz do coletor até à zona de extração e outra que transporta e transfere a luz ao longo do comprimento do tubo. Assim, na primeira variante é necessário ter um material altamente refletor, enquanto no segundo, para além de refletor, tem de ser transparente, para deixar a luz passar ao longo da conduta. [9][11]

Das diferentes configurações possíveis, apenas são apresentadas soluções como fibras óticas, tubos ocos prismáticos, utilização de lentes ou espelhos.

A fibra ótica permite ter uma grande eficiência visto conseguir transportar a luz por reflexão interna total. No entanto tem duas grandes limitações: a primeira, e certamente a mais importante, é o seu custo; a segunda, a grande dificuldade em concentrar a luz numa pequena abertura. Para ultrapassar estes problemas, têm sido estudadas novas abordagens, nomeadamente através da utilização de concentradores luminescentes que absorvem a luz solar e a emitem como luz fluorescente, transportando-a noutros materiais mais baratos do que a fibra ótica. [9]

Tubos ocos prismáticos são dispositivos com a superfície em acrílico transparente que em certos ângulos de incidência conseguem transportar a luz com 100% de reflexão. Para os restantes ângulos de incidência, a luz é transferida. Desta forma, permitem transportar e transferir a luz ao longo do comprimento do tubo.

Está provado que o uso de lentes é capaz de manter concentrado um feixe de luz dadas as suas propriedades de transmissão. Estas lentes são colocadas perpendicularmente ao eixo do tubo, necessitando, por isso, de ter um bom sistema coletor de luz solar. No entanto, são sistemas caros e exigem grande precisão na sua montagem. [9]

Outra solução é utilização de espelhos que, embora possuam refletividades entre 85 e 98%, são uma opção barata. Estes, como transportam a luz através de múltiplas reflexões

especulares, necessitam de ser combinados com sistemas de redirecção da luz (por exemplo LCP) para conseguirem ter boa eficiência. [9]

2.1.3. Elemento emissor

O elemento emissor ou difusor tem como função distribuir a luz o mais uniforme possível no espaço onde se encontra o tubo de luz instalado. A sua propriedade mais importante é a transparência, ou transmissividade, que indica a quantidade de luz incidente que atravessa o material.

Por norma, utilizam-se difusores em acrílico ou policarbonato, de cor clara ou opaca, podendo a superfície ser lisa ou com vários tipos de relevo. [6] Está comprovado que os difusores claros são capazes de distribuir a luz com maior eficiência. [12]



Figura 22: Difusores. [6]



Figura 23: Outros tipos de difusores. [13]

Sobre os difusores aplicados a tubos de luz, existe pouca literatura que os descreve e caracteriza, todavia, é possível apresentar alguns exemplos de sistemas que divergem do modelo geral de tubos de luz, quer para horizontais quer verticais. Exemplos esses estão apresentados no subcapítulo 2.2.

2.2. Exemplos de sistemas existentes

Nos nossos dias apareceram alguns sistemas de captação, e aproveitamento, da luz natural ligeiramente diferentes dos sistemas de tubos de luz convencionais. Das diferentes soluções encontradas destacam-se alguns que, pela sua originalidade, serão aqui apresentados a título de exemplo. Dos diferentes tipos de sistemas destacam-se os seguintes:

1. Tubos de luz horizontais com difusores longitudinais;
2. Tubos de luz com helióstato e difusão ao longo do tubo vertical;
3. Tubos de luz horizontais e verticais com dispersão luminosa ao longo dos tubos com recurso a LCP, prateleiras refletoras e anéis de PMMA;

2.2.1. Tubos de luz horizontais com difusores longitudinais

Neste caso é apresentado um sistema coletor diferente dos anteriormente descritos. É composto por três componentes: uma câmara refletora, de secção transversal trapezoidal, um refletor, em alumínio, que muda a sua inclinação consoante a posição do sol, e um vidro que fecha a abertura para o exterior.

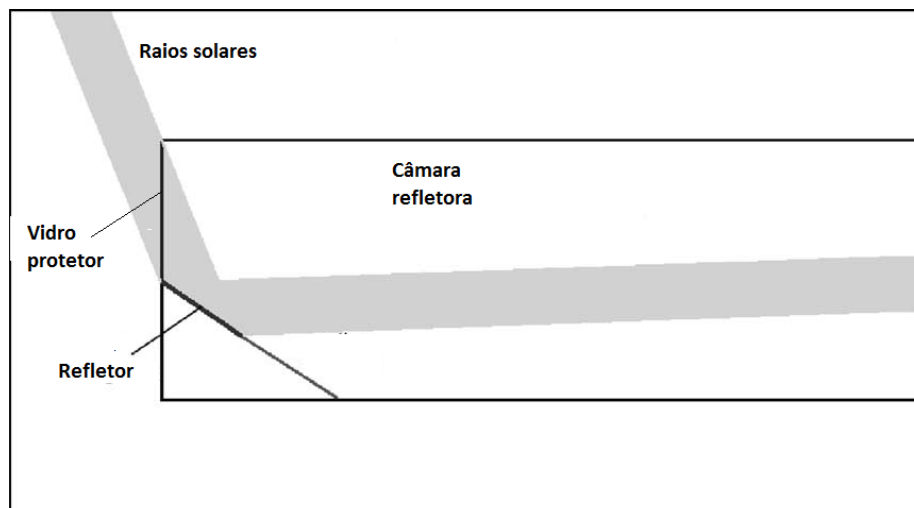


Figura 24: Esquema do sistema coletor. [14]

Com os raios solares redirecionados para o interior do tubo pelo refletor, estes são transportados pela conduta refletora, e difundidos no espaço por uma série de aberturas ao longo do comprimento da mesma. Neste caso, existem dois tipos de materiais difusores nas aberturas. Um, como é normal, de alta transparência e outro, com valor mais baixo. Este difusor com transparência mais baixa é aplicado nas aberturas onde incidem os raios redirecionados pelo refletor, com o objetivo de controlar os picos de energia luminosa. [14]

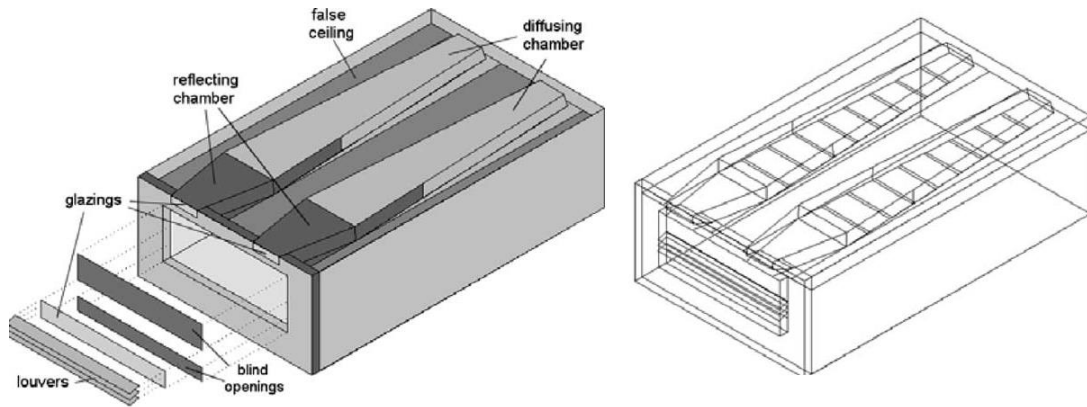


Figura 25: Esquema da aplicação de tubos de luz horizontais. [14]

2.2.2. Tubos de luz com helióstato e difusão ao longo do tubo vertical

Neste subcapítulo é feita a descrição de um projeto denominado “Arthelio” desenvolvido pela Universidade Técnica de Berlim. O objetivo principal foi criar um sistema capaz integrar luz artificial em tubos de luz, sendo apenas ligada quando a iluminação natural não for suficiente.

O sistema coletor é composto por um helióstato que se orienta consoante a posição do Sol para redirecionar a luz solar para o interior do tubo de luz. O tubo propriamente dito é constituído por um filme prismático que reflete e transmite a luz simultaneamente, isto é, existe reflexão total quando os ângulos de incidência respeitam a lei de Snell, permitindo assim o transporte da luz ao longo do comprimento do tubo. A luz é então transmitida para os outros ângulos de incidência.

Os ângulos de incidência que permitem a extração da luz são atingidos colocando um objeto difuso e refletor no centro do tubo. Desta forma, ao incidir este objeto, a luz será dispersa, alterando a suas direções, possibilitando a sua saída do tubo.

No final de cada tubo, é instalado um espelho para refletir de volta a luz que ainda não foi transmitida, permitindo desta forma aumentar as hipóteses desta ser aproveitada. [11]

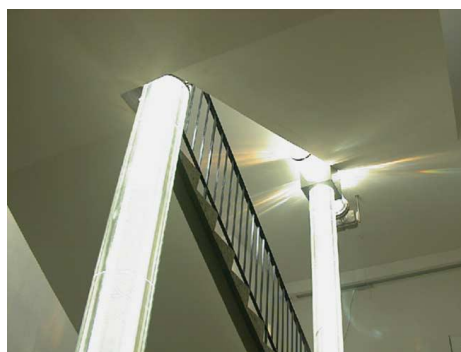


Figura 26: Esquema do projeto Arthelio. [11]

2.2.3. Tubos de luz horizontais e verticais com dispersão luminosa ao longo dos tubos com recurso a LCP, prateleiras refletoras e anéis de PMMA

Aqui são descritos dois tipos de tubos de luz, um horizontal e outro vertical.

O horizontal usa um coletor LCP, já descrito anteriormente, para orientar a luz na direção da conduta. A conduta, de material altamente refletor, tem uma forma quadrangular, onde são instaladas aberturas para colocação do sistema extrator.

Em cada abertura é colocado um refletor e disposto de forma a apenas se retirar uma porção de luz. A dispersão da luz é feita por painéis triangulares de LCP que redirecionam a luz em direção ao teto de forma a espalhar a luz o mais uniforme possível.

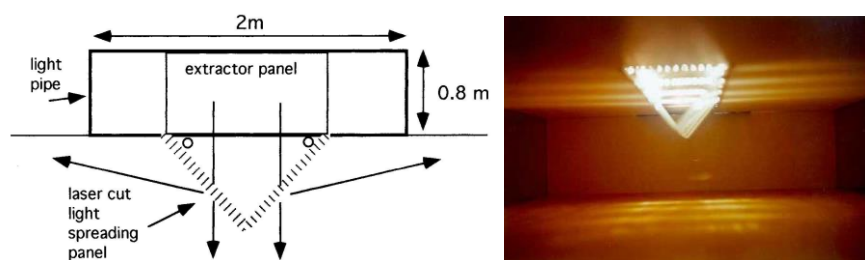


Figura 27: Esquema exemplificativo do sistema extrator com painéis triangulares de LCP. [9]

Neste caso, o tubo vertical tem como objetivo oferecer iluminação natural a um edifício com vários andares. Para isso, as dimensões do tubo são significativamente maiores que o normal - dois metros de diâmetro e cerca de dezoito metros de comprimento.

Para o elemento coletor de luz solar foi escolhida uma cúpula prismática. No sistema de difusão da luz, foram usadas duas soluções: a primeira, a luz é retirada a partir de refletores cónicos, em acrílico transparente, colocados no interior do tubo, sendo a distribuição da luz difundida por prateleiras horizontais circulares refletindo a luz em direção ao teto. A outra solução estudada é a aplicação de um anel em PMMA tingido de verde fluorescente, em que as moléculas fluorescentes absorvem parte da radiação solar que neles incide. A radiação absorvida é transportada até às bordas do anel por reflexão total interna e depois reemitida na forma de radiação fluorescente. Para se obter uma luz de cor neutra, seria necessário uma combinação de três cores fluorescentes (vermelho, azul e verde). [9]

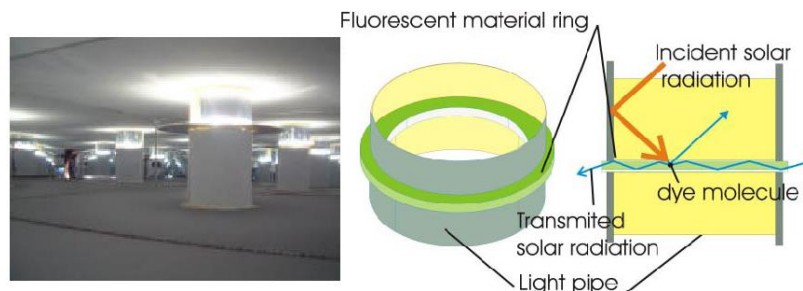


Figura 28: Extratores - à esquerda, solução com prateleira horizontal circular, à direita, solução com anel de PMMA fluorescente. [9]

3. Modelos de simulação dinâmica

O objetivo deste capítulo é apresentar um conjunto de ferramentas de simulação que permitam, por um lado determinar o comportamento dinâmico dos sistemas de tubos de luz integrados com a iluminação artificial, e, por outro apresentar, de forma simplista, um modelo de simulação dinâmica dos consumos de energia (necessidades energéticas) afetas às soluções de iluminação artificial e mista (tubos de luz com iluminação artificial).

3.1. Modelos de simulação de iluminação

Atualmente existem vários softwares no mercado que nos permitem simular tanto a iluminação natural como artificial. São ferramentas importantes pois possibilitam, de uma forma fácil e eficaz, avaliar o comportamento físico da luz tendo em conta as mais variadas combinações de luz natural e artificial. Desta forma é possível otimizar o uso de energia, reduzindo o custo associado, mantendo as condições de conforto para os seus ocupantes.

3.1.1. Iluminação natural e artificial

Dos diferentes softwares existentes, segue uma descrição breve daqueles que são mais utilizados.

RADIANCE

A ferramenta RADIANCE foi desenvolvida por Grag Ward no Lawrence Berkeley Laboratory, na Califórnia. Este programa, de grande complexidade, fornece resultados bastante precisos graficamente ou em folhas de dados, como também o comportamento fotométrico de geometrias complicadas de um determinado ambiente. [15]

Utiliza o método Ray Tracing, ou seja, calcula o trajeto dos raios luminosos no sentido oposto à sua propagação natural, tendo em conta todas as interações com as diferentes superfícies, até que cheguem à fonte luminosa. [3]

Uma das vantagens deste programa é o fato de não ter qualquer limitação no que toca à geometria do espaço em estudo, bem como às características dos materiais utilizados no seu

interior. Por esta razão é muitas vezes utilizado na análise de novas tecnologias de iluminação artificial e natural. [16]

Atendendo ao objetivo deste trabalho, o RADIANCE seria o programa ideal para testar a aplicabilidade de tubos de luz. No entanto, como já foi referido, trata-se de uma ferramenta muito complexa e, dado o tempo disponível para realização deste trabalho, nunca seria possível dominar o software ao ponto de recolher resultados satisfatórios.

SUPERLITE

O programa SUPERLITE também produzido no Lawrence Berkeley Laboratory, utiliza o método Radiosity no cálculo de iluminação de espaços interiores.

O método Radiosity tem por base as trocas radiativas entre superfícies perfeitamente difusas num espaço fechado. Consiste em discretizar cada superfície em várias para as quais são calculados de fluxo de radiação emitido e refletido. [3]

Este foi desenvolvido para simular a iluminação proveniente de aberturas exteriores integrando, se necessário, a contribuição luminosa de luminárias. Possui funcionalidades como a previsão de sombreamentos consequentes de obstruções internas ou externas do espaço em estudo. [17]

No cálculo da iluminância para uma certa área de ocupação, este tem em conta a luz direta e difusa proveniente de reflexões do exterior bem como as suas reflexões no interior. Uma das desvantagens desta ferramenta é o fato de não calcular o nível de conforto visual, nem controlar a quantidade de iluminação artificial necessária para um certo valor de iluminância imposto pelo utilizador. [18]

ADELINE

Este programa, desenvolvido pelo Fraunhofer Institut for Buildings na Suíça, simula o desempenho de iluminação natural e artificial em espaços interiores simples ou complexos. Compila dados geométricos, fotométricos, climáticos e óticos, apresentando os resultados na forma gráfica e numérica, possuindo ainda uma interface com ferramentas CAD. [15]

Para a simulação tanto da iluminação natural como artificial, este programa utiliza as ferramentas SUPERLITE e RADIANCE, descritas anteriormente.

Uma das funcionalidades deste software é a possibilidade de análise do conforto visual dos ocupantes de um determinado espaço. Permite calcular o consumo energético em iluminação artificial anual para um certo valor de iluminância definido pelo utilizador. A partir deste cálculo, é possível introduzir estes dados em programas de simulação dinâmica das necessidades térmicas de um edifício, como por exemplo o TRNSYS. [19]

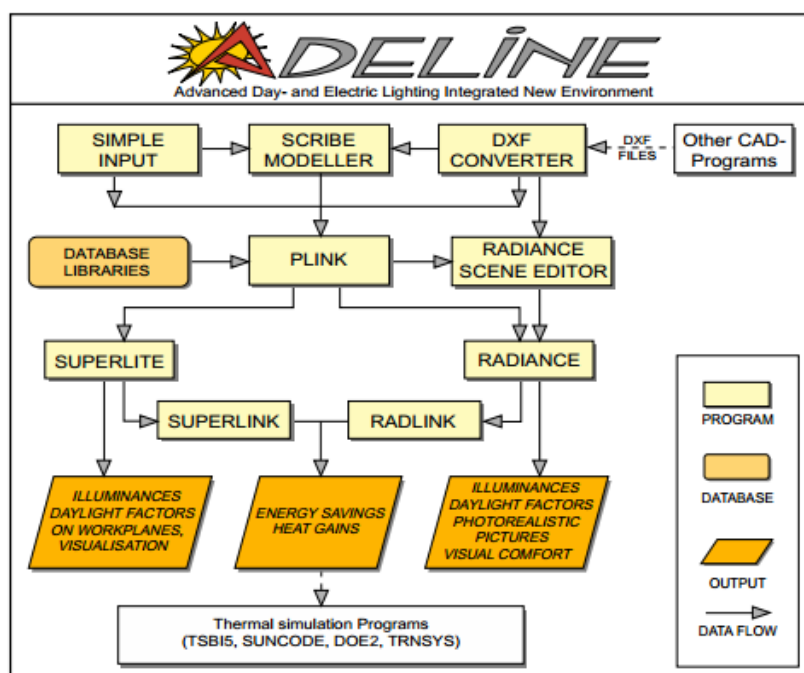


Figura 29: Esquema do funcionamento do software ADELINe. [19]

RELUX

A ferramenta RELUX, criada pela Relux Informatik AG na Suíça, permite simular a iluminação no interior de um espaço tendo em conta a iluminação natural e artificial. Oferece não só uma interface simples para o utilizador como também uma vasta biblioteca de luminárias, sensores e lâmpadas de diferentes fornecedores.

Permite gerar imagens realísticas dando a possibilidade de visualizar os resultados em duas ou três dimensões, transmitindo uma ideia do produto final ao utilizador. Para o cálculo das simulações utiliza o método Radiosity enquanto para processamento de imagens usa o método Ray Tracing. [20]

DIALUX

Este software foi desenvolvido pela Exportlux com o objetivo de integrar os efeitos da iluminação natural e artificial. Põe ao dispor do utilizador uma interface bastante acessível, com comandos fáceis de utilizar potenciando uma aprendizagem rápida.

A ferramenta utiliza os dois métodos anteriormente referidos: o Radiosity e o Ray Tracing. Tem assim, a capacidade de calcular com precisão a propagação e distribuição da luz num espaço em estudo, dispondo uma grande variedade de saída de dados. Estes podem ser apresentados graficamente com linhas isográficas ou gradientes de cores, ou na forma de tabelas de valores.

Possibilita ainda a observação dos resultados em três dimensões, podendo ou não ser realistas porque dependem muito da qualidade do monitor de trabalho, dão uma ideia importante ao projetista da iluminação resultante.

Disponibiliza uma biblioteca bastante completa com catálogos de luminárias e lâmpadas distintas de diversos fornecedores, para além de uma grande variedade de objetos e texturas que permitem aproximar a simulação o mais possível da realidade. [15]

Como se constata, os programas DIALUX e RELUX tem características muito semelhantes. Entre os dois, para este trabalho, o software escolhido foi o DIALUX pois, não só, a título pessoal, se revelou ser mais intuitivo e de fácil utilização, como também facultava uma saída de resultados compatível com a fornecida pelo HOLIGILM (software escolhido para simulação de tubos de luz).

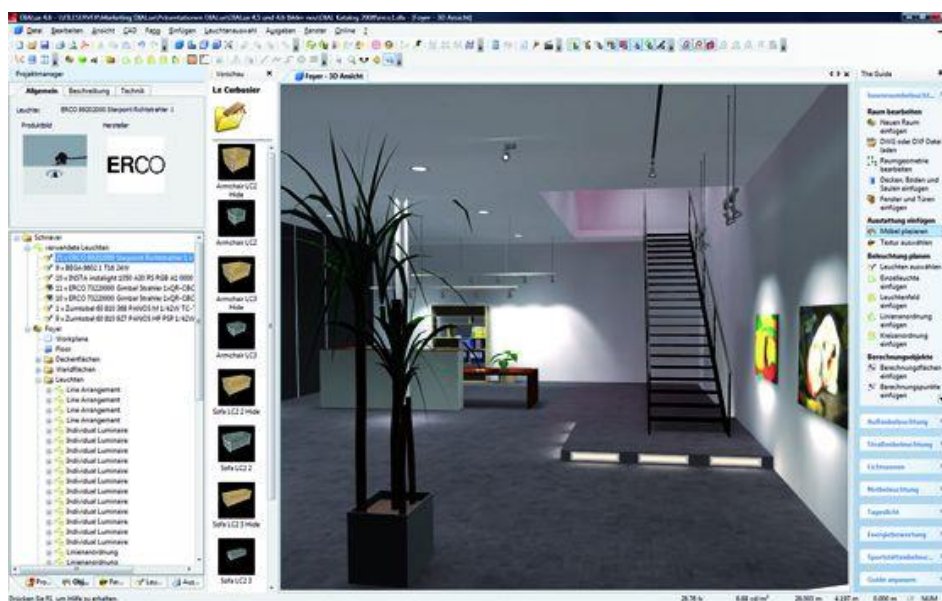


Figura 30: Interface do DIALUX. [21]

3.1.2. Iluminação natural de tubos de luz

Jenkis-Muneer

O modelo de Jenkis-Muneer, resumidamente, está organizado em duas etapas: primeiro calcula o fluxo luminoso no difusor e, posteriormente, a partir do fluxo luminoso calculado, estima a iluminância num ponto a uma distância qualquer do difusor de grande transparência. De notar que este modelo é válido para tubos verticais retilíneos e não retilíneos. [12]

A determinação do fluxo luminoso é feita a partir da iluminância existente no exterior, das dimensões do tubo, da configuração da curva, se existir. Para o cálculo da iluminância, este modelo necessita de ter caracterizada a posição do tubo de luz como, também, as coordenadas do ponto onde se pretende prever esta grandeza. [1]

Este modelo está limitado ao tipo de difusor pois, no cálculo do fluxo luminoso, a partir de dados recolhidos experimentalmente, foi deduzida uma expressão que relaciona as dimensões do tubo, diâmetro e comprimento, com a transmissividade total do tubo, ou seja, a transmissividade combinada da cúpula e difusor. [22]

Zhang-Muneer

O modelo de Zhang-Muneer é, igualmente, um método semi-empírico, que a partir de medições de iluminância, ao longo de vários meses, provenientes de tubos de luz de 0.21, 0.33, 0.45 e 0.53 metros de diâmetro, com comprimentos entre 0.6 e 1.2 metros, é gerada uma expressão aproximada que permite calcular um fator de penetração de luz natural num dado dia – “Daylight Penetration Factor” ou DPF. Este fator corresponde à percentagem de iluminância existente no exterior, direta e difusa, que é obtida numa certa posição no interior do espaço onde o tubo de luz está instalado. [12][23]

Existe a possibilidade de se utilizar este método em tubos com dimensões diferentes, assim como também em tubos não retilíneos, necessitando para tal duas variáveis extra: correspondente valor a “n” curvas de 30° e um fator de perda de energia (“energy-loss factor”) deduzido a partir de medições realizadas. [12]

Este método, ao contrário do anterior, tem a vantagem de levar em conta o dia em estudo, ao exigir o valor da altitude solar e do índice de claridade do céu como variáveis da expressão deduzida. [24]

A limitação deste modelo, à semelhança do anterior, é o tipo de difusor usado, sendo neste caso usado um material opaco, que gera iluminação menos intensa. [23]

Tsangrassoulis

Proposto por Aris Tsangrassoulis da Universidade de Atenas, este modelo faz uma abordagem mais teórica de prever a iluminância num ponto sabendo a luminância que passa pelo difusor e a respetiva distância entre estes. O modo de cálculo da luminância no difusor parte de dados recolhidos que estimam a transmissividade de um tubo de determinado comprimento e a transparência de coletores e difusores. [23]

The SkyVision software

Este software, desenvolvido pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá, é uma ferramenta que permite simular diversos tipos de sistemas de aproveitamento de luz solar, incluindo tubos de luz.

A partir de uma grande variedade de parâmetros necessários introduzir no programa, não só relativamente aos tubos de luz, mas também sobre o espaço onde vai ser colocado, ele é capaz de reproduzir resultados bastante interessantes. Vários modelos de céu estão também à disposição do utilizador, podendo este software simular diferentes condições atmosféricas.

Uma das suas limitações é o facto de não apresentar, detalhadamente, valores de iluminância para uma certa posição. Apenas fornece o resultado da iluminância média na zona do chão numa área específica.

Infelizmente, durante a realização deste trabalho, nunca foi possível aceder a este software por nunca se ter encontrado disponível para acesso livre. [23]

Holigilm software

Este software parte de um modelo físico que permite calcular a resultante iluminação no interior de um espaço a partir de tubos de luz. Desta forma, tem em conta as propriedades de

transmissão da cúpula e do difusor como, também, o grau de refletividade do tubo propriamente dito.

Relativamente à fonte luminosa, o software contabiliza a luminância proveniente do Sol e do céu, tendo à disposição vários modelos, alguns segundo a norma ISO 15469.

Com base numa abordagem analítica, a partir dos modelos de céu anteriormente referidos e escolhendo o local e hora de um certo dia, permite calcular a iluminância resultante num dado plano de trabalho, definindo as suas dimensões e distância ao difusor do tubo de luz. [10]

Após uma utilização breve deste programa, detetaram-se duas das limitações: uma, o fato de apenas ter disponível um tipo de tubo de luz – vertical retilíneo – e, outra, o não contabilizar os efeitos refletores da envolvente interior do espaço em análise.

Ainda assim, foi este o software utilizado nas simulações do caso de estudo neste trabalho, por ter sido o único software disponível online nesta área.

3.2. Modelos de simulação de necessidades energéticas

O elevado número de variáveis necessárias para determinar as necessidades energéticas de um edifício, como a sua geometria, propriedades físicas dos seus materiais, o clima onde se situa e sua tipologia, resulta num exercício de grande complexidade. De forma a obviar tais dificuldades, foram desenvolvidos vários softwares facilitando sua a modelação e simulação.

De seguida é apresentada uma breve descrição de algumas destas ferramentas mais utilizadas na atualidade.

ESP-r

Este software permite analisar fatores de influência no desempenho energético e ambiental de um edifício. O seu cálculo baseia-se na análise de volumes finitos e conservação de energia, massa e quantidade de movimento tendo em conta as influências do clima, ocupação e sistema de controlo.

Tem a capacidade de simular tecnologias inovadoras como utilização de iluminação e ventilação natural, distribuição de contaminantes, sistemas de geração de calor e eletricidade, painéis fotovoltaicos e adaptação de CFD transiente.

A definição do edifício, no geral, consiste na caracterização da geometria, construção, cargas internas relativamente à ocupação, iluminação e equipamentos, ventilação e infiltrações e sistemas energéticos.

Tem como desvantagem, o fato de ser um programa complexo, que exige elevados conhecimentos na área por forma a rentabilizar todas as suas funcionalidades. [25]

EnergyPlus

Esta ferramenta foi desenvolvida a partir de outros dois softwares existentes, DOE-2 e BLAST, embora apresente uma nova estrutura modular escrita na linguagem Fortran 90. Este não possui nenhuma interface pois apenas funciona como motor de simulação.

Uma das vantagens é o fato da sua estrutura modular facilitar a integração de outras funcionalidades a partir da introdução de novos módulos, sem modificar o código base do EnergyPlus.

A figura seguinte demonstra a forma como o EnergyPlus está organizado. Como se pode observar, é constituído por três grupos principais:

- um gestor de simulação, que controla todo o processo de simulação;
- um módulo de simulação de balanço energético e de massa baseado no software IBLAST –uma versão do BLAST com a possibilidade de integrar sistemas AVAC;
- um simulador de sistemas de edifícios, sendo a sua função fazer a comunicação entre o módulo que faz o balanço térmico e outros módulos de sistemas AVAC, como por exemplo caldeiras, chillers, bombas e ventiladores. [26]

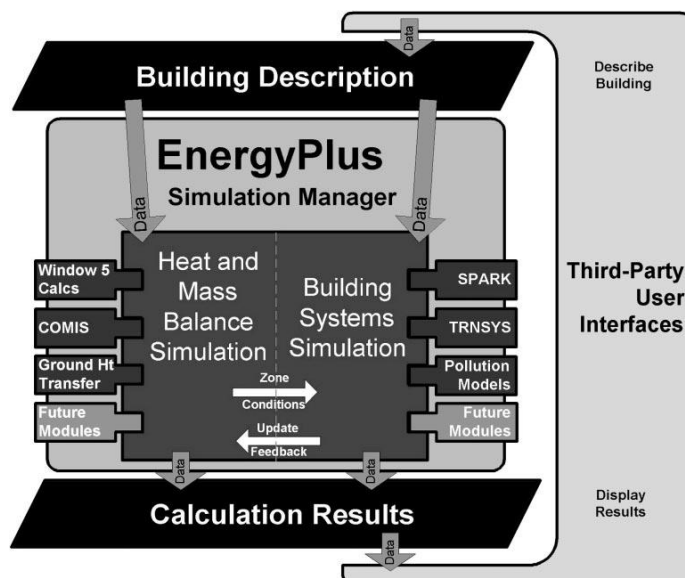


Figura 31: Esquema do funcionamento do software EnergyPlus. [26]

TRNSYS

O TRNSYS é um software de simulação do comportamento de sistemas transientes. Enquanto a maioria de outros programas estão mais orientados na performance de sistemas elétricos e térmicos, o TRNSYS permite, ainda, ser usado para modelar outros tipos de sistemas dinâmicos. Isto é possível devido à sua estrutura modular, que reconhece uma linguagem de descrição de um sistema em que o utilizador especifica os componentes que o constituem, bem como a ligação entre eles.

Esta ferramenta pode dividir-se em duas partes:

- a primeira, é um motor (chamado de kernel) que lê e processa os dados de entrada, resolve o sistema de forma iterativa, determina a convergência e apresenta os resultados em várias formas (por exemplo gráficos ou tabelas). Permite ainda determinar as propriedades termofísicas, inverter matrizes, realizar regressões lineares e interpolações.

- a segunda parte, diz respeito a uma biblioteca extensa de componentes com cerca de 150 modelos que vão desde bombas, turbinas eólicas, processadores de dados meteorológicos como também equipamentos AVAC, desde os mais básicos aos mais inovadores.

Das suas possíveis aplicações, as principais são: sistemas de ar condicionado e ventilação, sistemas solares térmicos e fotovoltaicos, e sistemas de cogeração de energia.

Uma das vantagens da sua natureza modular é permitir a introdução de outros modelos matemáticos não existentes na sua biblioteca padrão de uma forma flexível.

Para uma correta utilização do programa, seria necessário despende de algum tempo a estudar todas as suas ferramentas e potencialidades, porém, devido aos limites temporários estipulados para a concretização da presente investigação tal não é possível. Ainda assim, este foi o software utilizado por haver na instituição onde este trabalho foi desenvolvido, pessoas com conhecimentos e destreza necessária que se disponibilizaram a apoiar a realização das simulações previstas, concluindo-se o trabalho no tempo previsto. [27]

3.3. Modelo de sobreposição de várias fontes luminosas

Um dos problemas identificados na realização deste trabalho foi a inexistência de softwares que permitissem simular simultaneamente iluminação natural proveniente de janelas, com a resultante de tubos de luz e a iluminação artificial. Assim, para o ultrapassar foi necessário perceber de que forma se poderia fazer a sobreposição destes diferentes efeitos luminosos.

Para o efeito, foram realizados vários testes, cujo objetivo era compreender a forma como dois programas distintos, DIALUX e HOLIGILM, realizam este cálculo. Foi então utilizado um método puramente empírico que consistia em três etapas:

- escolher duas fontes de luz e simulá-las individualmente no software;
- simular as duas fontes de luz em simultâneo;
- perceber que relação havia entre a simulação das duas fontes individuais com a simulação das duas fontes em simultâneo.

Este procedimento foi aplicado no programa DIALUX, para as seguintes configurações de fontes de luz:

- uma janela horizontal e outra vertical;
- duas luminárias iguais;

Conclui-se que se pode considerar que o DIALUX soma os efeitos luminosos das duas fontes de luz individuais porque, fazendo a comparação entre os resultados obtidos somando as simulações das duas fontes de luz individuais com os valores conseguidos através da simulação feita com as duas fontes de luz em simultâneo, as diferenças achadas entre eles nunca atingiram 1% da simulação com as duas fontes de luz em simultâneo (resultados podem ser vistos no Anexo A).

No programa HOLIGILM, aplicou-se exatamente o mesmo procedimento a dois tubos de luz colocados em posições diferentes. Constatou-se que o resultado foi o mesmo que no DIALUX

– o programa soma os efeitos individuais de cada fonte de luz. Neste caso o erro nunca superou o valor de 0,1%.

Assim e atento ao fato de este trabalho se tratar de um estudo exploratório, considerou-se pouco relevante o erro de 1%, pelo que, se optou por adotar este método de sobreposição de várias fontes luminosas aqui demonstrado.

Tubos de luz, serão sistemas que permitem reduzir efetivamente o consumo energético? – um estudo exploratório

4. Caso de estudo

O caso de estudo aqui proposto resume-se à verificação e quantificação da redução do consumo energético a partir da utilização de tubos de luz com o intuito de melhorar o aproveitamento da luz natural num certo espaço interior. Este, pertence a um edifício de escritórios genérico, com apenas uma fachada para o exterior e uma janela. Esta configuração está representada na figura seguinte.

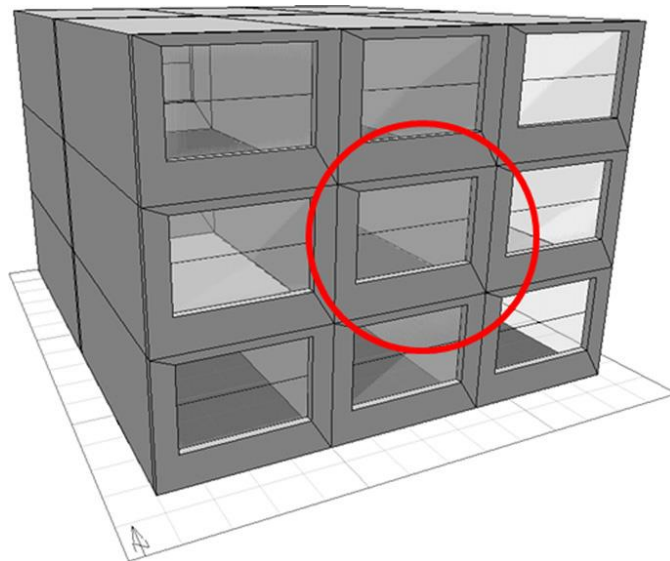


Figura 32: Ilustração do posicionamento da sala no edifício. [28]

O escritório em causa posiciona-se numa zona central do edifício, como representa a figura anterior, reduzindo desta forma o número de variáveis influenciáveis no consumo energético no que toca à climatização, pondo em destaque apenas o efeito da redução de iluminação artificial proveniente da instalação de tubos de luz.

Na verdade, neste estudo, abordaram-se cinco salas que apenas se diferenciam sua profundidade, por ser este um parâmetro dimensional determinante no conforto visual dos ocupantes quando se analisa a luz natural proveniente de janelas.

4.1. Caracterização do caso de estudo

Como já se fez menção, este trabalho tem como objetivo determinar as reduções do consumo energético com a aplicação de tubos de luz. Assim, esta análise centrou-se na redução de utilização de iluminação artificial, posteriormente, na consequente influência nas necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento (climatização) e por último, no consumo energético total.

O edifício de escritórios localiza-se na cidade do Porto, sendo apenas analisado um tipo de escritório: forma de um paralelepípedo com a fachada exterior orientada a Sul - quatro metros de largura e três de altura contendo uma janela no centro.

A profundidade foi definida segundo a norma EN 15193 – “Energy performance of buildings – Energy requirements for lighting”. Esta norma define uma forma de cálculo da profundidade máxima que a luz natural consegue alcançar a partir de uma janela de uma fachada exterior. [29]

Um fator importante a ter em conta é a reflexão da envolvente interior do escritório. Para o efeito, foi utilizada a norma EN 12461- “Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places”. Nesta norma encontram-se diferentes intervalos de grau de reflexão para cada tipo de elemento interior:

- paredes: limite inferior de 30% e superior de 80%;
- teto: limite inferior de 60% e superior de 90%;
- chão: limite inferior de 10% e superior de 50%. [30]

No respeitante à janela, estabeleceu-se as suas dimensões e propriedades: dois metros de largura e um metro de meio de altura com um grau de transmissividade de 90%.

Para a obtenção dos resultados nos softwares de simulação, foi necessário criar um plano de trabalho para definir a área de análise. Para tal, foi consultada a norma EN 13779, “Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems”, que sugere uma forma de caracterizar a “zona ocupada”, estabelecendo valores típicos da distância entre diferentes tipos de superfícies do espaço e a referida zona ocupada. [31]

A distinção entre iluminação suficiente e insuficiente para os ocupantes do escritório foi conseguida através da definição de um limite mínimo de iluminância. Através da nova consulta à norma EN 12461, constatou-se que esta propõe um valor de 500 lux para um escritório cuja atividade dos seus ocupantes é ler, escrever e trabalhar no computador. [30]

4.2. Caracterização do espaço interior

Como já se fez referência, a definição das profundidades das salas foi determinada segundo a norma EN 15193. Esta propõe a seguinte forma de cálculo da profundidade de alcance máximo da luz natural, $a_{D,máx}$:

$$a_{D,máx} = 2,5 \times (h_{Li} - h_{Ta})$$

em que a diferença $h_{Li} - h_{Ta}$ se refere à altura da janela da fachada exterior. [29]

Tendo as dimensões da janela definidas (dois metros de largura e um metro e meio de altura), conseguiu-se obter o resultado de 3,75 metros de máxima profundidade de luz natural.

Tendo este valor por base, estabeleceram-se as profundidades das cinco salas em análise: a mais pequena dada pela norma, a maior com o dobro da definida pela norma, e, nas restantes assumiram-se valores intermédios. Assim, chegou-se à tabela 3 com os diferentes comprimentos das salas em estudo:

Tabela 3: Valor da profundidade de cada sala em estudo.

Sala	Profundidade (L) [m]
1	3,75
2	4,69
3	5,63
4	6,57
5	7,50

Na figura 33 mostra-se um esquema das dimensões dos vários escritórios.

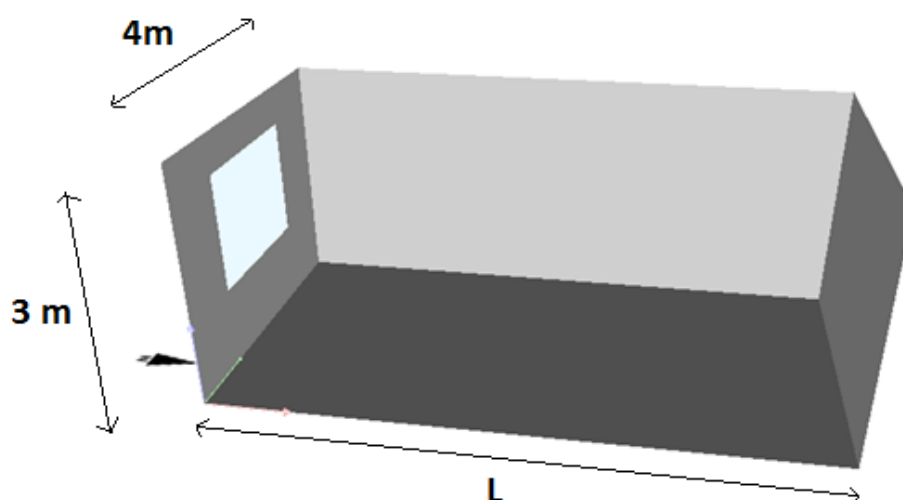


Figura 33: Esquema das dimensões das diferentes salas em estudo.

Relativamente às características das paredes, chão e teto, como já foi referido no subcapítulo anterior, levou-se em linha de conta os intervalos sugeridos pela norma EN 12461. Os valores utilizados foram os já pré-definidos no DIALUX, e, como se pode observar na tabela 4, encontram-se dentro dos intervalos sugeridos pela referida norma.

Tabela 4: Graus de reflexão utilizados na envolvente interior dos espaços em estudo.

Elemento	Valor utilizado
Paredes	50%
Teto	80%
Chão	20%

4.3. Metodologia e determinação da distribuição das luminárias nos diferentes casos de análise

O posicionamento das luminárias no espaço foi estabelecido tendo em conta o facto de haver uma janela na fachada exterior, isto é, as luminárias foram colocadas paralelamente à janela de forma a apenas se ligar as luminárias necessárias na zona onde a luz proveniente da janela já não for suficiente.

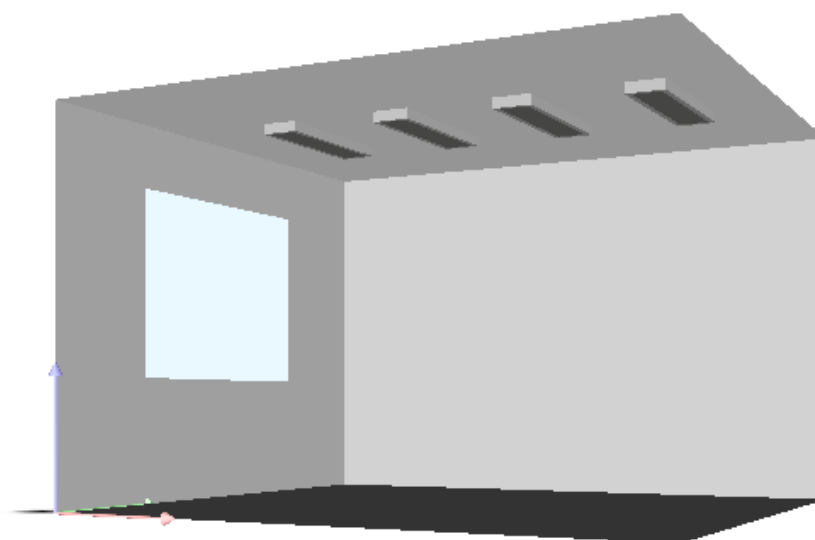


Figura 34: Exemplo da distribuição das luminárias (sala 2).

Consoante o comprimento da sala, o número de luminárias instaladas varia. O critério utilizado para a distribuição das luminárias foi o seguinte: a primeira colocada a um metro da janela; as restantes colocadas com um intervalo de um metro de distância entre elas, sucessivamente até ao fim da sala. A tabela 5 demonstra o resultado obtido para cada sala, isto é, o número de luminárias instaladas e de acordo com o seu comprimento.

Tabela 5: Número de luminárias instaladas para cada sala.

Sala	Comprimento da sala [m]	Número de Luminárias instaladas
1	3,75	3
2	4,69	4
3	5,63	5
4	6,57	6
5	7,5	7

A luminária utilizada foi escolhida aleatoriamente do catálogo da marca PHILIPS, existente na biblioteca do DIALUX, sendo o modelo TBH424 2xTL5-28W HFP C5-H GT com uma potência de 56W.

É importante referir que o posicionamento e a escolha das luminárias foram feitos para que de noite, ou seja, sem contribuição luminosa da janela, se conseguisse obter o limite estipulado de iluminância mínima (500 lx) na área de análise (esta será descrita posteriormente) de cada sala, apenas se todas elas estiverem ligadas. Desta forma diminui-se a probabilidade de excesso de consumo de energia e consequentemente obter-se resultados mais precisos.



Figura 35: Luminária TBH424 2xTL5-28W HFP C5-H GT da marca Philips.

De seguida apresentam-se duas tabelas que demonstram exatamente o que se descreveu, mais concretamente na sala 2 (quatro luminárias instaladas).

A primeira tabela demonstra a distribuição de iluminância na área de análise obtida com as três luminárias mais afastadas da janela ligadas, enquanto que a segunda diz respeito ao resultado com as quatro luminárias ligadas.

Tabela 6: Distribuição de iluminância da sala 2 com três luminárias ligadas.

3 luminárias ligadas													
3,5	255	311	368	421	469	517	553	569	572	573	560	529	485
3,25	322	394	470	541	606	666	713	736	742	741	723	682	627
3	386	475	570	660	740	814	869	900	909	906	882	834	768
2,75	439	544	655	762	856	942	1004	1042	1053	1050	1020	966	891
2,5	478	595	719	840	945	1040	1109	1151	1163	1159	1127	1068	986
2,25	502	628	761	891	1004	1105	1178	1222	1236	1232	1197	1135	1048
2	511	639	777	909	1025	1129	1204	1249	1262	1258	1223	1160	1071
1,75	502	628	761	891	1004	1105	1178	1222	1236	1232	1197	1135	1048
1,5	478	595	719	840	945	1040	1109	1150	1163	1159	1126	1068	986
1,25	439	544	655	762	856	942	1004	1042	1053	1050	1020	966	891
1	386	475	570	660	740	814	869	900	909	906	881	834	768
0,75	322	394	470	542	606	666	713	736	742	741	723	682	627
0,5	256	311	368	421	469	517	553	569	572	573	560	529	485
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
MÉDIA	405,8	502,5	604,8	703,1	789,6	869,0	927,4	960,6	970,2	967,7	941,5	891,4	821,6

Como se observa na tabela 6, as três luminárias ligadas não são suficientes para superar o limite de 500 lx em todo o comprimento da sala.

Tabela 7: Distribuição de iluminância da sala 2 com todas as luminárias ligadas.

4 luminárias ligadas													
3,5	491	543	586	614	631	649	659	652	637	622	597	557	507
3,25	630	697	753	790	815	837	849	840	822	801	767	715	652
3	767	848	916	964	996	1022	1033	1026	1004	976	933	871	796
2,75	885	979	1056	1114	1151	1181	1193	1185	1160	1128	1077	1007	921
2,5	975	1080	1165	1228	1269	1301	1313	1306	1279	1243	1188	1112	1018
2,25	1034	1146	1236	1303	1346	1380	1393	1385	1357	1320	1261	1181	1082
2	1056	1171	1262	1330	1374	1409	1422	1414	1385	1347	1288	1207	1104
1,75	1034	1146	1236	1303	1346	1380	1393	1385	1357	1320	1261	1181	1081
1,5	975	1080	1165	1228	1269	1301	1313	1306	1279	1243	1188	1112	1018
1,25	885	979	1056	1114	1151	1181	1193	1185	1160	1128	1077	1007	921
1	767	848	916	964	996	1022	1033	1026	1004	976	933	871	796
0,75	630	697	753	790	815	837	849	840	822	800	767	714	652
0,5	491	543	586	614	631	649	659	652	637	622	597	556	507
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
MÉDIA	816,9	904,4	975,8	1027,4	1060,8	1088,4	1100,2	1092,5	1069,5	1040,5	994,9	930,1	850,4

No caso da tabela 7, as quatro luminárias ligadas superam o limite de iluminância imposto de 500 lx.

4.4. Condições particulares de simulação

Atento à exiguidade do tempo disponível para a realização deste estudo, tornou-se impossível proceder à simulação de um período de um ano, pelo que se escolheram os dias 21 de Julho e 21 de Dezembro, respetivamente os dias de projeto para cálculo de carga térmica de Verão e Inverno no dimensionamento de sistemas de climatização.

Para cada um destes dias foi feita uma simulação, no DIALUX, para dia de céu limpo, sem luz direta do Sol, e outra, de céu encoberto. A opção de não considerar luz direta do Sol justifica-se com o facto de, num contexto real, ser muito provável que nalguns momentos ao

longo do dia, a janela possa estar parcialmente, ou, até na totalidade, à sombra devido a obstruções provenientes de elementos exteriores como outros edifícios e/ou árvores.

Considerando um dia típico de trabalho, efetuaram-se simulações hora a hora desde as 8 até às 18 horas.

Para o levantamento dos resultados, foi necessário criar um plano de trabalho para definir a área de análise. Como já se fez referência, para a definição deste plano foi consultada a norma EN 13779. Esta indica uma forma de caracterizar a “zona ocupada” e estabelece valores típicos da distância entre diferentes envolventes interiores do espaço e a referida zona ocupada. De entre os diferentes tipos de superfícies interiores que a norma expõe, apenas se apresentam, na tabela 8, aqueles que são do interesse para o presente estudo.

Tabela 8: Valores de referência para a distância entre as várias superfícies e a “zona ocupada”. [31]

Superfície	Intervalo (m)	Valor padrão (m)
Janelas	0,50 até 1,50	1,00
Paredes interiores	0,15 até 0,75	0,50

Assim, foi feita uma margem de um metro na parede exterior e de meio-metro nas restantes paredes. A altura da área de análise foi definida em 0,8 metros visto ser a altura típica de uma secretária de escritório.

Com o plano de trabalho definido, foi necessário estabelecer uma malha de pontos para o cálculo. Escolheu-se uma malha retangular de 0,25x0,25 metros de forma a cobrir a área de análise.

Neste processo, foram encontradas algumas incompatibilidades porque três dos cinco comprimentos das salas não eram múltiplos do passo da malha. Houve assim, a necessidade de se proceder a alguns ajustes. Exemplo disso, é o caso da sala 2, onde os últimos pontos analisados se situam a 4 metros da janela Esta foi a profundidade máxima analisada por ser o valor de profundidade mais distante da janela e múltiplo do passo da malha depois de subtraída a margem de 0,5 metros ao comprimento total da sala.

A figura 36 é demonstrativa do que se acabou de explicar.

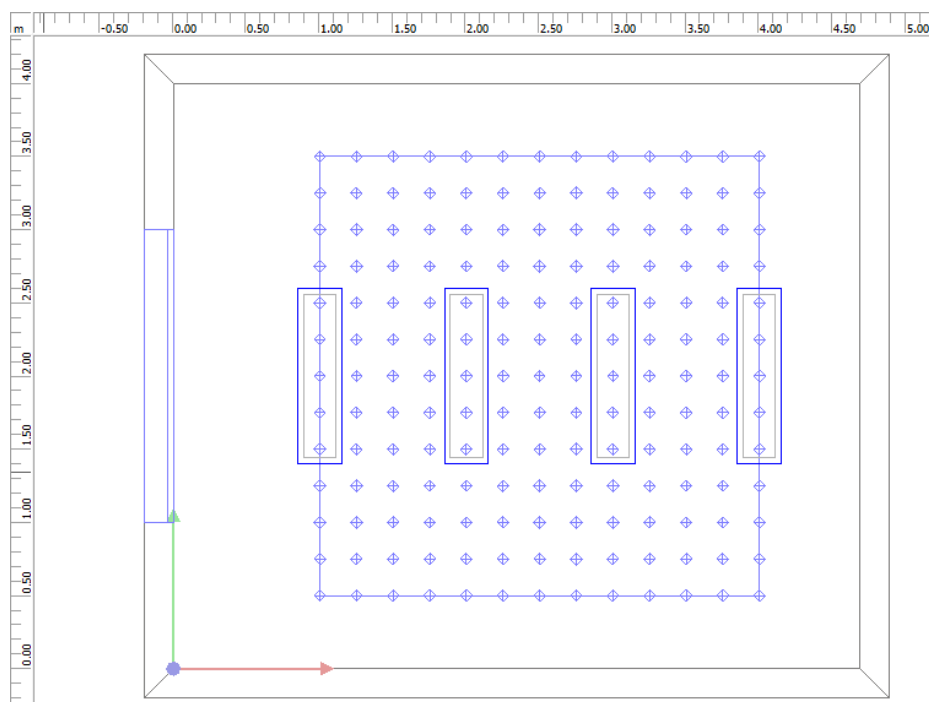


Figura 36: Malha de cálculo definida para a sala 2.

4.5. Definição dos perfis de iluminação artificial

Depois de feitas as simulações nas cinco salas para os dias 21 de Julho e 21 de Dezembro, céu limpo e céu encoberto, das 8 às 18 horas, foram feitas as verificações do limite de iluminância imposto de 500 lx.

As verificações foram realizadas calculando a média dos pontos do eixo vertical para cada ponto do eixo horizontal da malha. De seguida é apresentado um exemplo para que se possa perceber o método aplicado de forma mais clara. Para o efeito, apresenta-se a tabela 9, respeitante à distribuição das iluminâncias, relativamente à luz natural proveniente da janela, da sala 2 às 10 horas, no dia 21 de Julho, com céu limpo.

Tabela 9: Distribuição da iluminância da sala 2 proveniente apenas da janela no dia 21 de Julho com céu limpo às 10 horas.

	10h												
3,5	914	784	661	541	462	407	343	297	263	231	214	196	184
3,25	991	808	672	542	466	405	340	293	260	229	211	192	188
3	1087	843	688	558	469	397	345	297	254	226	208	188	186
2,75	1133	862	689	566	449	388	336	303	251	222	208	185	183
2,5	1121	862	701	537	444	375	322	287	252	220	204	185	184
2,25	1099	828	668	531	433	366	322	279	244	214	199	183	178
2	1005	777	633	513	417	358	297	268	237	207	190	182	172
1,75	916	703	582	468	393	330	291	259	229	202	191	180	172
1,5	787	621	524	424	358	309	279	251	221	198	186	168	168
1,25	657	549	459	398	328	289	261	240	210	188	180	161	160
1	538	460	407	352	308	273	247	225	201	186	173	159	158
0,75	430	388	357	310	281	258	231	207	192	176	166	157	154
0,5	348	343	316	294	267	246	219	202	187	170	159	150	146
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
MÉDIA	848,2	679,1	565,9	464,2	390,4	338,5	294,8	262,2	230,8	205,3	191,5	175,8	171,8
	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

Como se constata, a partir do ponto de 1,5 metros do eixo horizontal é necessária iluminação artificial para que a média de iluminâncias seja superior a 500 lx.

Com este resultado, realizou-se outra simulação ligando agora a luminária mais distante da janela, posicionada a 4 metros da janela – luminária 4 -, de forma a perceber se era suficiente para que em todos os pontos ao longo do comprimento da sala estivessem acima de 500 lx. O resultado conseguido expõe-se na tabela 10.

Tabela 10: Distribuição da iluminância da sala 2 proveniente da janela e da luminária 4 no dia 21 de Julho com céu limpo às 10 horas.

	10h												
3,5	941	817	704	598	534	499	459	440	438	436	446	443	434
3,25	1022	846	724	610	554	520	487	476	483	493	511	513	515
3	1120	887	747	637	573	534	521	518	525	547	573	584	591
2,75	1169	910	753	653	566	543	537	557	563	593	631	646	658
2,5	1159	913	770	630	570	541	539	563	593	628	674	699	715
2,25	1138	880	739	628	564	540	550	570	604	647	699	733	747
2	1043	830	706	612	550	535	529	564	604	650	702	745	755
1,75	954	755	653	565	524	504	519	550	589	636	691	729	741
1,5	824	672	593	518	483	476	497	527	562	607	655	682	698
1,25	692	596	524	485	444	443	461	494	521	559	603	622	635
1	572	504	465	430	413	409	423	446	472	506	538	555	563
0,75	460	426	408	377	369	373	378	390	415	440	465	478	482
0,5	375	376	360	350	339	338	335	345	360	375	391	397	396
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
	882,2	724,0	626,6	545,6	498,7	481,2	479,6	495,4	517,6	547,5	583,0	602,0	610,0
	OK	OK	OK	OK	NOK	NOK	NOK	NOK	OK	OK	OK	OK	OK

Como verifica, entre o ponto 2 e 2,75, a média da iluminância mantém-se abaixo dos 500 lx. Assim, e face aos resultados obtidos, é necessário ligar as luminárias 3 e 4 e observar se desta forma se verificam valores acima do limite estipulado. O resultado está refletido na tabela 11.

Tabela 11: Distribuição da iluminância da sala 2 proveniente da janela e da luminária 3 e 4 no dia 21 de Julho com céu limpo às 10 horas.

	10h												
3,5	1006	901	811	730	696	691	676	671	671	668	665	638	600
3,25	1102	952	860	781	764	768	769	777	789	795	794	765	730
3	1216	1013	911	845	829	837	866	890	904	919	920	891	854
2,75	1276	1053	941	892	861	894	937	991	1006	1028	1035	1002	961
2,5	1274	1068	974	891	893	928	983	1047	1088	1113	1121	1092	1047
2,25	1259	1043	953	902	906	951	1023	1087	1134	1166	1176	1150	1098
2	1166	995	924	891	898	954	1013	1093	1146	1181	1190	1171	1113
1,75	1075	918	868	840	866	915	992	1067	1119	1154	1168	1146	1093
1,5	940	827	797	779	806	863	941	1011	1056	1092	1102	1075	1031
1,25	800	740	712	725	739	794	862	928	964	994	1007	979	938
1	667	630	630	639	668	713	768	818	850	879	885	862	825
0,75	541	531	544	548	579	621	659	691	721	742	748	730	696
0,5	440	460	466	483	501	530	552	576	594	607	609	592	562
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
	981,7	856,2	799,3	765,1	769,7	804,5	849,3	895,9	926,3	949,1	955,4	930,2	888,3
	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Olhando para a tabela 11 percebe-se que foram atingidos valores acima dos 500 lx em toda a área de análise da sala. O resultado, depois de aplicar este procedimento a todas as horas, foi resumido numa tabela, para melhor compreensão, na qual se demonstra quantas luminárias são necessárias estarem ligadas para cada hora, ao longo do dia.

Tabela 12: Perfil de iluminação artificial para o dia 21 de Julho com céu limpo.

	LUM. 1	LUM. 2	LUM. 3	LUM. 4
8h	OFF	OFF	ON	ON
9h	OFF	OFF	ON	ON
10h	OFF	OFF	ON	ON
11h	OFF	OFF	ON	ON
12h	OFF	OFF	OFF	ON
13h	OFF	OFF	OFF	ON
14h	OFF	OFF	OFF	ON
15h	OFF	OFF	OFF	ON
16h	OFF	OFF	OFF	ON
17h	OFF	OFF	ON	ON
18h	OFF	OFF	ON	ON

Neste caso, verifica-se que é necessário ter a luminária 4 sempre ligada e a 3 durante o início e fim do dia.

Já no dia 21 de Dezembro, também com céu limpo, a distribuição de luminárias ligadas ao longo do dia muda radicalmente-

Tabela 13: Perfil de iluminação artificial para o dia 21 de Dezembro com céu limpo.

	LUM. 1	LUM. 2	LUM. 3	LUM. 4
8h	ON	ON	ON	ON
9h	OFF	OFF	ON	ON
10h	OFF	OFF	OFF	ON
11h	OFF	OFF	OFF	ON
12h	OFF	OFF	OFF	OFF
13h	OFF	OFF	OFF	OFF
14h	OFF	OFF	OFF	ON
15h	OFF	OFF	OFF	ON
16h	OFF	OFF	ON	ON
17h	ON	ON	ON	ON
18h	ON	ON	ON	ON

A diferença encontrada resulta do fato de no mês de Julho a iluminância proveniente do Sol ser mais intensa que em Dezembro; todavia, em Julho, como o Sol atinge alturas superiores a meio do dia, torna-se mais complicado a luz chegar a zonas de maior profundidade.

4.6. Simulação da distribuição da iluminância a partir de tubos de luz

Nesta simulação foi usado o software HOLIGILM que nos permite obter a distribuição de iluminância proveniente de um ou mais tubos de luz num espaço retangular.

A caracterização do espaço está limitada às suas dimensões e orientação relativamente aos pontos cardeais.

Da mesma forma que no DIALUX, é possível criar um cenário de luz com o mesmo tipo de variáveis: hora, dia, mês e tipo de céu; sendo que para este último parâmetro, o software HOLIGILM apresenta opções diferentes. Assim, para dia de céu limpo escolheu-se o modelo de céu “CIE Clear polluted, urban”; para dia de céu encoberto optou-se pelo o modelo “CIE Overcast”.

Relativamente às propriedades do tubo de luz, este é caracterizado pela transparência da cúpula, diâmetro, comprimento e grau de reflexão interna do tubo, e transparência do difusor.

Quanto às propriedades físicas da cúpula, tubo e difusor, foram escolhidas segundo dados fornecidos pela Chatron – empresa vendedora destes dispositivos (catálogos encontram-se no anexo B). Os valores estão resumidos na tabela 14.

Tabela 14: Propriedades dos componentes do tubo de luz utilizado.

Transparência da Cúpula	90%
Reflectância interior do Tubo	98%
Transparência do Difusor	92%

Quanto às dimensões do tubo, foi escolhido um diâmetro de 530mm, um dos modelos da empresa Chatron, com um metro de comprimento.

A única variável em falta é o posicionamento do(s) tubo(s) no interior da sala. O critério adotado para a definição da posição do(s) dispositivo(s), meramente empírico, teve como objetivo mínimo, para a condição mais favorável, ou seja, no dia 21 Junho com céu limpo, haver pelo menos uma hora em que não fosse necessário iluminação artificial. Assim, este processo acabou por ser um pouco iterativo tendo por base as seguintes considerações:

- observar os resultados obtidos para a distribuição de iluminação natural e estimar, para cada sala, qual seria a posição mais favorável para colocação de um tubo de luz;
- testar a posição anteriormente referida, adicionando um tubo de luz, tendo em conta o objetivo mínimo anteriormente referido;

Depois de alguns testes, chegou-se à conclusão que o objetivo mínimo não era possível de ser cumprido na sala 4 e 5. Assim sendo, decidiu-se introduzir um segundo tubo de luz para as referidas salas, mantendo para o primeiro tubo de luz a posição obtida na sala 3. O posicionamento do segundo tubo de luz foi realizado segundo o mesmo procedimento descrito anteriormente mas tendo em conta a contribuição do primeiro tubo de luz.

Desta forma, o posicionamento do(s) tubo(s) de luz foi determinado para cada sala apresentando-se na tabela seguinte a 15 da respetiva posição a partir da janela.

Tabela 15: Posicionamento dos tubos de luz para as diferentes salas em estudo.

Sala	Posicionamento do Tubo de luz nº 1 [m]	Posicionamento do Tubo de luz nº 2 [m]
1	2,00	-
2	2,50	-
3	3,50	-
4	3,50	5,00
5	3,50	5,00

Como se pode observar, bastou o posicionamento dos tubos de luz da sala 4 para cumprir o objetivo mínimo na sala 5.

4.7. Método de cálculo dos perfis de iluminação artificial com a contribuição do tubo de luz

Mais uma vez foram simuladas as distribuições de iluminância nos dias em estudo para as cinco salas utilizando o programa HOLIGILM. Os dados, depois de tratados e reformulados para a mesma configuração que o DIALUX fornecia, foram somados com os valores de iluminância provenientes apenas da janela.

Para determinar os perfis de iluminação artificial, não sendo possível introduzir no DIALUX os dados recolhidos no HOLIGILM, foi necessário calcular, individualmente, as distribuições de iluminância de cada luminária para cada uma das salas, sem contabilizar o efeito da luz natural da janela, a partir do DIALUX.

Deste modo, depois de somar a iluminância oriunda da janela com a proveniente do(s) tubo(s) de luz, adotou-se o método descrito anteriormente na verificação do limite de 500 lx imposto pela norma EN 12461.

De seguida é mostrado, para o dia 21 de Julho com céu limpo, na sala 2, às 10 horas - o mesmo dia exemplificado no cálculo dos perfis de iluminação artificial sem tubo(s) de luz - a descrição deste procedimento.

Assim, apresenta-se na tabela 16 a distribuição de iluminância apenas da luz da janela para o dia em questão.

Tabela 16: Distribuição de iluminância proveniente da janela às 10h do dia 21 de Julho com céu limpo para a sala 2.

	10h												
3,5	914	784	661	541	462	407	343	297	263	231	214	196	184
3,25	991	808	672	542	466	405	340	293	260	229	211	192	188
3	1087	843	688	558	469	397	345	297	254	226	208	188	186
2,75	1133	862	689	566	449	388	336	303	251	222	208	185	183
2,5	1121	862	701	537	444	375	322	287	252	220	204	185	184
2,25	1099	828	668	531	433	366	322	279	244	214	199	183	178
2	1005	777	633	513	417	358	297	268	237	207	190	182	172
1,75	916	703	582	468	393	330	291	259	229	202	191	180	172
1,5	787	621	524	424	358	309	279	251	221	198	186	168	168
1,25	657	549	459	398	328	289	261	240	210	188	180	161	160
1	538	460	407	352	308	273	247	225	201	186	173	159	158
0,75	430	388	357	310	281	258	231	207	192	176	166	157	154
0,5	348	343	316	294	267	246	219	202	187	170	159	150	146
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
MÉDIA	848,2	679,1	565,9	464,2	390,4	338,5	294,8	262,2	230,8	205,3	191,5	175,8	171,8
	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

A tabela 17 refere-se aos ganhos luminosos provenientes do tubo de luz às 10 horas, no dia 21 de Julho, céu limpo, para a sala 2.

Tabela 17: Distribuição de iluminância proveniente do tubo de luz às 10h do dia 21 de Julho com céu limpo para a sala 2.

	10h												
3,5	319,7	372,2	425,4	475,1	516,1	543,3	553	543,7	516,8	476	426,5	373,3	320,7
3,25	372,3	438,9	507,5	572,5	627	663,6	676,7	664,1	628	573,8	508,8	440,2	373,5
3	425,7	507,7	593,6	676,4	746,5	794,1	811,2	794,7	747,7	677,8	595,2	509,2	427
2,75	475,5	573	676,6	777,8	864,7	924	945,3	924,7	866	779,5	678,3	574,6	477
2,5	516,8	627,7	747,1	865	967	1037	1062	1038	968,3	866,6	748,8	629,3	518,2
2,25	544,3	664,6	795	924,7	1038	1115	1144	1116	1039	926,1	796,5	666	545,5
2	554,1	677,8	812,4	946,4	1063	1144	1173	1144	1064	947,4	813,5	679	555,1
1,75	544,9	665,4	796	925,9	1039	1117	1145	1117	1039	926,5	796,7	666,1	545,6
1,5	518	629,2	749	867,1	969,3	1039	1064	1039	969,4	867,3	749,2	629,6	518,3
1,25	477,1	574,9	679	780,5	867,5	926,7	947,7	926,6	867,3	780,4	678,9	574,9	477,2
1	427,4	509,8	596,1	679,2	749,5	797	813,7	796,8	749,2	678,9	595,8	509,6	427,3
0,75	374	441	509,9	575,3	629,8	666,3	679,1	666,1	629,5	574,9	509,6	440,7	373,8
0,5	321,3	374,1	427,6	477,5	518,6	545,7	555,2	545,6	518,3	477,1	427,2	373,8	321,1
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
MÉDIA	451,6	542,8	639,6	734,1	815,1	870,2	890,0	870,5	815,6	734,8	640,4	543,6	452,3

Chegando aos resultados dos efeitos provenientes da janela e do tubo de luz em separado, procedeu-se à soma desses mesmos valores. A tabela 18 é demonstrativa do resultado deste cálculo.

Tabela 18: Distribuição de iluminância resultante depois de somar os efeitos provenientes da janela e do tubo de luz.

	10h												
3,5	1233,7	1156,2	1086,4	1016,1	978,1	950,3	896	840,7	779,8	707	640,5	569,3	504,7
3,25	1363,3	1246,9	1179,5	1114,5	1093	1068,6	1016,7	957,1	888	802,8	719,8	632,2	561,5
3	1512,7	1350,7	1281,6	1234,4	1215,5	1191,1	1156,2	1091,7	1001,7	903,8	803,2	697,2	613
2,75	1608,5	1435	1365,6	1343,8	1313,7	1312	1281,3	1227,7	1117	1001,5	886,3	759,6	660
2,5	1637,8	1489,7	1448,1	1402	1411	1412	1384	1325	1220,3	1086,6	952,8	814,3	702,2
2,25	1643,3	1492,6	1463	1455,7	1471	1481	1466	1395	1283	1140,1	995,5	849	723,5
2	1559,1	1454,8	1445,4	1459,4	1480	1502	1470	1412	1301	1154,4	1003,5	861	727,1
1,75	1460,9	1368,4	1378	1393,9	1432	1447	1436	1376	1268	1128,5	987,7	846,1	717,6
1,5	1305	1250,2	1273	1291,1	1327,3	1348	1343	1290	1190,4	1065,3	935,2	797,6	686,3
1,25	1134,1	1123,9	1138	1178,5	1195,5	1215,7	1208,7	1166,6	1077,3	968,4	858,9	735,9	637,2
1	965,4	969,8	1003,1	1031,2	1057,5	1070	1060,7	1021,8	950,2	864,9	768,8	668,6	585,3
0,75	804	829	866,9	885,3	910,8	924,3	910,1	873,1	821,5	750,9	675,6	597,7	527,8
0,5	669,3	717,1	743,6	771,5	785,6	791,7	774,2	747,6	705,3	647,1	586,2	523,8	467,1
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
MÉDIA	1299,8	1221,9	1205,6	1198,3	1205,5	1208,7	1184,8	1132,6	1046,4	940,1	831,8	719,4	624,1
	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

Como se observa, ao longo da profundidade da sala, a iluminância mantém-se superior a 500 lx. Desta forma, não é necessário somar a contribuição da iluminação artificial.

Nos casos em que os dois efeitos luminosos naturais não são suficientes, seria preciso somar a contribuição de luminárias, começando-se pela mais distante, sucessivamente, até à mais próxima da janela.

A tabela 19 mostra o resultado do perfil de iluminação artificial ao longo do referido dia.

Tabela 19: Perfil de iluminação artificial obtido no dia 21 de Julho com céu limpo para a sala 2.

	LUM. 1	LUM. 2	LUM. 3	LUM. 4
8h	OFF	OFF	OFF	ON
9h	OFF	OFF	OFF	OFF
10h	OFF	OFF	OFF	OFF
11h	OFF	OFF	OFF	OFF
12h	OFF	OFF	OFF	OFF
13h	OFF	OFF	OFF	OFF
14h	OFF	OFF	OFF	OFF
15h	OFF	OFF	OFF	OFF
16h	OFF	OFF	OFF	ON
17h	OFF	OFF	OFF	ON
18h	OFF	OFF	OFF	ON

Para comparação, apresenta-se a tabela 20, com o resultado obtido para a mesma sala, no dia 21 de Dezembro, com céu limpo.

Tabela 20: Perfil de iluminação artificial obtido no dia 21 de Dezembro com céu limpo para a sala 2.

	LUM. 1	LUM. 2	LUM. 3	LUM. 4
8h	ON	ON	ON	ON
9h	OFF	OFF	ON	ON
10h	OFF	OFF	OFF	ON
11h	OFF	OFF	OFF	OFF
12h	OFF	OFF	OFF	OFF
13h	OFF	OFF	OFF	OFF
14h	OFF	OFF	OFF	OFF
15h	OFF	OFF	OFF	ON
16h	OFF	OFF	ON	ON
17h	ON	ON	ON	ON
18h	ON	ON	ON	ON

4.8. Simulação das Necessidades Térmicas de um sistema de climatização

Para a simulação das necessidades térmicas utilizou-se o software TRNSYS, onde foram introduzidos os perfis de iluminação artificial com e sem a introdução de tubos de luz.

Esta simulação teve como objetivo compreender qual o efeito da instalação de tubos de luz no consumo energético em sistemas de climatização. Assim, foram efetuadas duas simulações para cada sala, nas quais apenas se alteraram os perfis de iluminação artificial. As características da sala e outros parâmetros mantiveram-se constantes, podendo ser consultadas no anexo C.

Por terem sido determinados dois perfis para o dia 21 de Julho e outros dois para 21 de Dezembro, fez-se corresponder, respetivamente, para a estação de arrefecimento e aquecimento, de forma a simular o uso de iluminação artificial durante um ano.

Assim, o ano foi dividido entre a estação de Verão e Inverno, tendo em conta o que é sugerido no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) – para o local em questão, Porto, a duração da estação de aquecimento, ou seja, Inverno, é de 6,7 meses. [32]

Como anteriormente se fez referência, para cada dia de estudo, foram definidos dois perfis: um de céu limpo e outro de céu encoberto. A sua utilização é feita consoante o índice de nebulosidade, disponibilizado pelo referido software, existente em cada hora. Para isso, foi usado o valor de 0,7 como limite entre céu limpo e encoberto.

Resumindo, para cada hora do ano, o software verifica primeiro se é Verão ou Inverno e depois, em cada momento, se o céu está limpo ou encoberto.

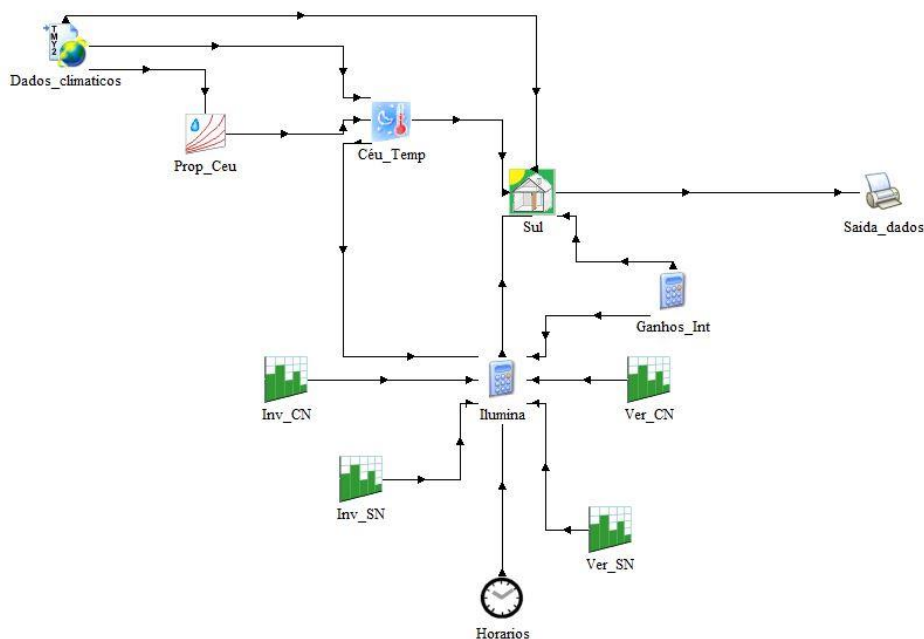


Figura 37: Esquema dos módulos utilizados na simulação no TRNSYS.

A figura 37 mostra o esquema dos módulos utilizados na simulação das necessidades energéticas para os casos em estudo.

O bloco “Sul” é responsável por calcular as necessidades térmicas de cada sala em estudo. Este tem em conta vários dados que são calculados pelos restantes blocos.

O conjunto de blocos “Dados_climaticos”, “Prop_Ceu” e “Céu_Temp” permitem calcular as propriedades do ambiente para cada hora do ano, mais especificamente o fator de nebulosidade.

Na calculadora “Ganhos_Int”, são especificados os ganhos internos associados aos equipamentos e iluminação artificial.

Nos blocos “Inv_CN” (Inverno, céu encoberto), “Inv_SN” (Inverno, céu limpo), “Ver_CN” (Verão, céu encoberto) e “Ver_SN” (Verão, céu limpo), são descritos os perfis de iluminação artificial que foram determinados pelas simulações nos softwares DIALUX e HOLIGLIM.

Quanto à segunda calculadora, “Ilumina”, verifica para cada hora em análise, se esta pertence à estação de Verão ou Inverno, e se nesse momento o céu está limpo ou encoberto. Assim, é responsável por transmitir ao bloco central, “Sul”, o perfil de iluminação correspondente.

O bloco “Horários” determina cada hora do ano, tendo como hora zero, a meia-noite de dia 31 de Dezembro do ano anterior. Como nesta simulação não se teve em conta os dias correspondentes ao Sábado e Domingo, este bloco teve, também, como função fazer essa diferenciação.

4.9. Simulação do consumo energético anual em iluminação artificial

O cálculo do consumo energético em iluminação artificial durante um ano foi feito seguindo a lógica descrita no subcapítulo anterior, ou seja, em cada hora, o perfil de iluminação artificial usado depende da nebulosidade e da altura do ano.

5. Apresentação e discussão de resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos segundo os objetivos previstos para o caso de estudo deste trabalho. Esses, enunciados no capítulo anterior, resumem-se à determinação da influência da introdução de tubos de luz no consumo energético relativamente à iluminação artificial, ao sistema de climatização e a nível global.

5.1. Energia consumida em iluminação artificial

Neste subcapítulo, o objetivo é avaliar o impacto da introdução de tubos de luz nas necessidades energéticas de um conjunto de espaços (5 salas) relativamente à iluminação artificial.

Assim começou-se primeiro por avaliar as situações em que os espaços não têm qualquer sistema de iluminação natural exceto a janela orientada a sul; depois, executou-se o mesmo estudo, mas agora com a instalação de tubos de luz. Por fim, apresenta-se a devida poupança energética obtida simulando a utilização dos diferentes espaços durante um ano.

5.1.1. Iluminação artificial sem tubo(s) de luz

Tendo todos os perfis de iluminação artificial já definidos, calculou-se a energia consumida para cada um deles. Assim, para proporcionar uma fácil leitura e uma melhor compreensão, os resultados obtidos são apresentados no gráfico da figura 38, que expressa o consumo energético para cada uma das cinco salas e por dia de estudo.

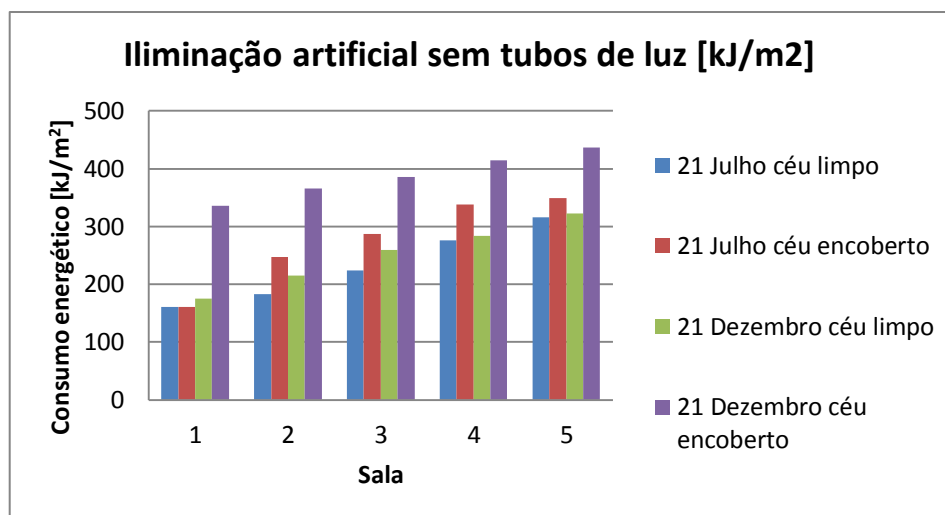


Figura 38: Consumo energético para os dias e salas em estudo sem a contribuição de tubos de luz.

Como se previa, o gráfico da figura 38 mostra claramente o aumento da utilização de energia à medida que a profundidade da sala aumenta, pelo fato de haver uma diminuição da penetração da iluminação natural proveniente da janela da sala.

Facilmente se verifica que nos dias de céu limpo o aproveitamento luminoso é superior aos dias de céu encoberto, sendo Julho o mês mais favorável.

Percebe-se que nos dias 21 Julho de céu limpo e de céu encoberto, na sala mais pequena, os valores são praticamente iguais. O fato de a sala ser de pequenas dimensões explica esta igualdade, visto que facilmente se consegue ultrapassar o limite de iluminância previamente estipulado, durante praticamente todo o dia, com apenas uma luminária ligada. Porém, com a utilização de um reóstato que automaticamente se ajuste à iluminância existente, essa igualdade seria desfeita - a iluminância de um dia de céu limpo é sempre superior a um dia de céu encoberto.

Constata-se ainda na primeira sala que, contrariamente às outras, no dia 21 de Dezembro com céu limpo, usa-se mais energia do que no dia 21 de Julho com céu encoberto. Em Dezembro, o ângulo solar não atinge valores muito altos, permitindo que a luz chegue a uma profundidade maior e, assim, melhore a eficiência do aproveitamento da luz natural. Todavia, essa profundidade é alcançada durante poucas horas; logo, a poupança que daí advém não é suficiente para combater a quantidade de luminárias ligadas que são necessárias nas horas iniciais e finais do dia. Isto acontece no mês de Dezembro, porque os dias são mais “curtos” no que diz respeito à amplitude de horas solares.

Olhando para a discrepância existente entre cada tipo de céu para cada um dos meses em estudo, conclui-se que em Dezembro esta é sempre maior que em Julho. Com isto, verifica-se que em Dezembro, o consumo de energia pode oscilar bastante mais do que em Julho.

5.1.2. Iluminação artificial com tubo(s) de luz

Um dos objetivos deste trabalho é perceber até que ponto se consegue reduzir o consumo energético relativo à iluminação quando se instala(m) tubo(s) de luz.

Seguindo a mesma lógica do subcapítulo anterior, apresenta-se o gráfico da figura 39 que resume os perfis de iluminação obtidos pela adição do efeito proveniente de um tubo de luz à iluminação natural transferida pela janela.

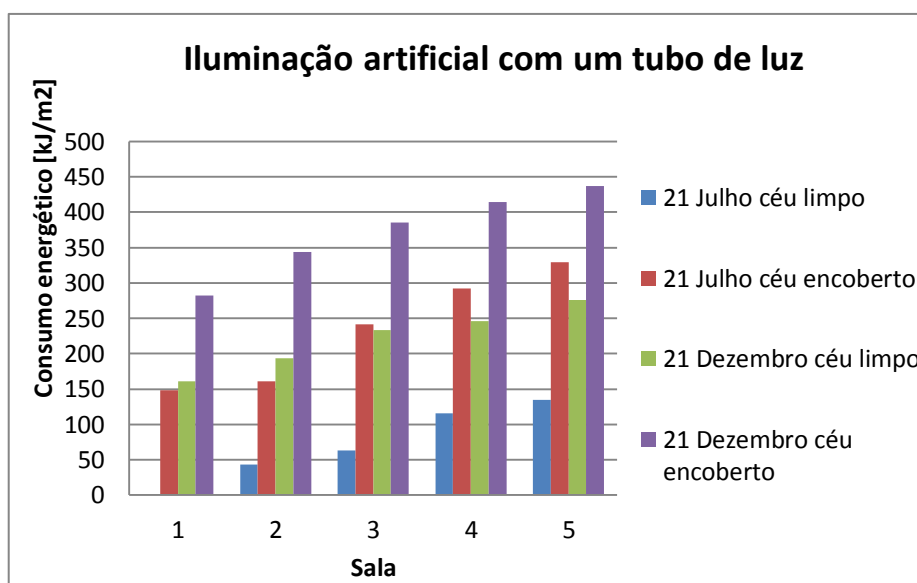


Figura 39: Consumo energético em iluminação artificial para os dias e salas em estudo com a contribuição de um tubo de luz

O resultado que salta mais à vista é o fato de, para o dia 21 de Julho de céu limpo, a utilização de energia ser muito inferior a todos de os outros dias – menos de metade do que qualquer outra combinação dia/céu para a mesma sala, chegando a não ser necessária a sua utilização na sala 1. Isto significa que o dia em questão é, de longe, o que apresenta a melhor empregabilidade. Este resultado é novamente comprovado no gráfico da figura 40, onde se apresentam as reduções em percentagem relativamente ao consumo sem a aplicação do tubo de luz.

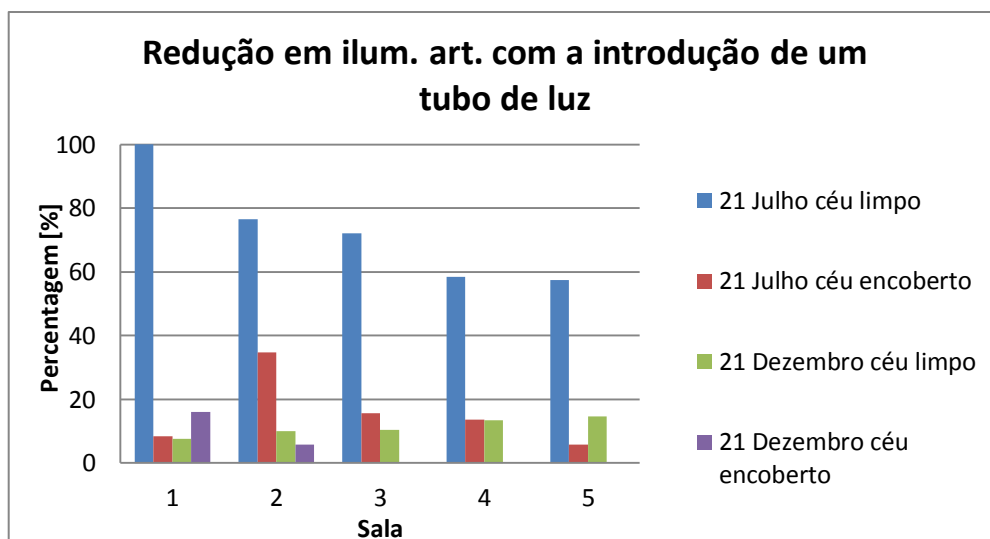


Figura 40: Poupança obtida em iluminação artificial com a instalação de um tubo de luz.

Para os casos no dia 21 de Dezembro com céu encoberto verifica-se que a partir da sala 2, o tubo de luz já não é capaz de contribuir com luz suficiente para reduzir a quantidade de luminárias ligadas. Como o ganho luminoso neste dia é muito baixo, e com o aumento da profundidade da sala e consequente afastamento da posição do tubo de luz em relação à janela, a pouca iluminação proveniente do tubo de luz dispersa-se por uma zona pouco iluminada naturalmente, o que origina a mesma necessidade de iluminação artificial na situação sem tubo de luz.

Relativamente aos casos no dia 21 de Julho com céu encoberto, a poupança decresce à medida que o comprimento da sala aumenta, como seria de esperar, exceto da primeira para a segunda sala. Esta exceção explica-se com o fato da área na primeira sala ser mais pequena, e por essa razão ser facilmente iluminada pela janela. A introdução do tubo de luz eleva o nível de iluminância dos pontos de maior profundidade para perto do limite imposto, pelo que se torna necessário ligar uma luminária. No caso da sala 2 acontece o mesmo, mas aqui a luminária que é ligada é suficiente para iluminar, não só o incremento de área em relação à sala 1, mas também esses mesmos pontos com iluminâncias perto do limite de 500 lx.

É importante referir que os resultados que foram obtidos não são lineares em relação ao aumento da área nas diferentes salas. Fatores que contribuem para este afastamento da linearidade são: a luminária em uso, o critério utilizado na distribuição das luminárias para cada sala, a não otimização do posicionamento dos tubos de luz como, também, o fato da iluminação se distribuir melhor à medida que a área aumenta - torna-se cada vez mais homogênea e uniforme.

Com a observação do gráfico da figura 40, nota-se uma tendência decrescente do consumo à medida que o comprimento da sala vai aumentando para o dia 21 de Julho com céu limpo. Para o dia 21 de Dezembro, com céu limpo, os resultados mostram-se praticamente constantes em todas as salas.

Outro pormenor interessante, também, é o fato de, observando-se com mais detalhe a distribuição de iluminância para cada hora de cada dia, existirem alguns casos em que é

necessário ligar mais uma luminária apenas, porque um ou dois pontos se encontram-se simultaneamente abaixo e muito perto do limite de iluminância estipulado. Este fenómeno pode ter como consequência o sobredimensionamento do perfil de iluminação, podendo originar resultados um pouco afastados do que seria esperado.

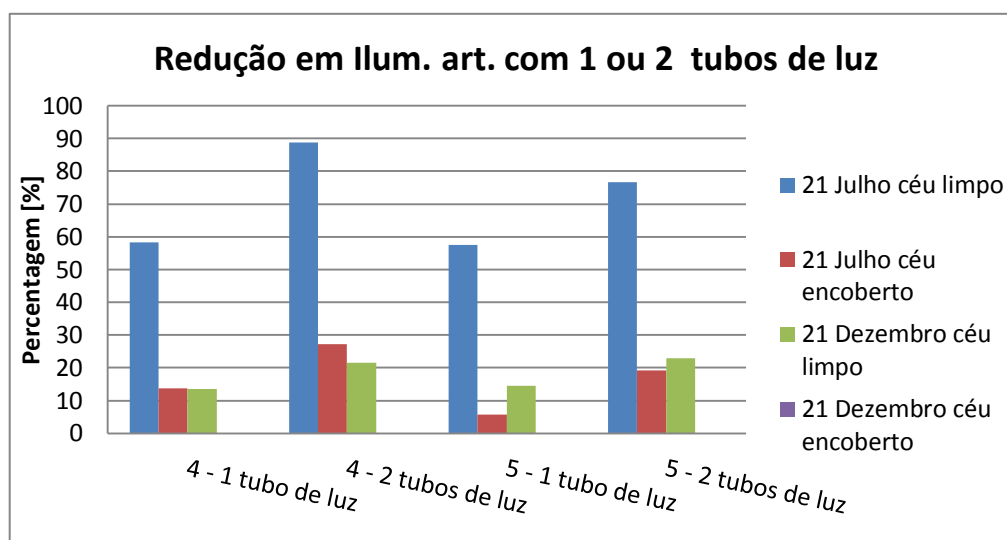


Figura 41: Comparação da redução entre a aplicação de um ou dois tubos de luz na sala 4 e 5.

No gráfico da figura 41 mostram-se os resultados obtidos ao introduzir o segundo tubo de luz na sala 4 e 5. Como seria de esperar, a poupança energética associada à iluminação artificial aumentou, exceto no dia 21 de Dezembro com céu encoberto. Mais uma vez para este dia, percebe-se que a introdução de tubos de luz não é suficiente para reduzir o consumo energético. Isto deve-se ao posicionamento dos tubos de luz, pois se estes estivessem mais perto da janela, seria muito provável que se conseguisse uma redução por muito pequena que fosse. Por outro lado, o seu contributo seria pouco aproveitado para os outros dias em estudo, onde a iluminação natural, a partir da janela, consegue chegar a profundidades próximas do posicionamento definido para este trabalho.

5.1.3. Poupança anual em iluminação artificial

A figura 42 apresenta as reduções percentuais da utilização de energia associada à iluminação artificial durante um ano ao introduzir-se um tubo de luz.

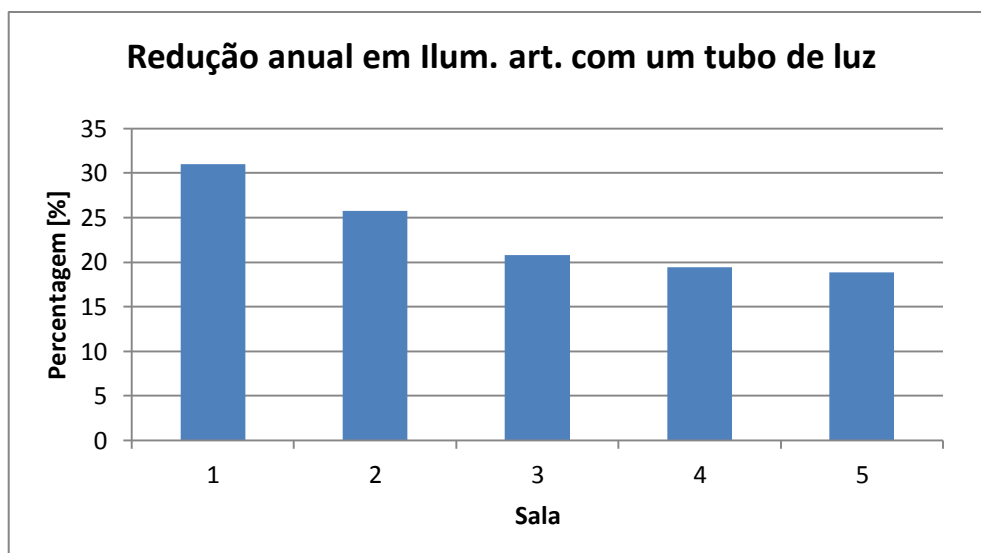


Figura 42: Redução anual do consumo energético em iluminação artificial obtida com a introdução de um tubo de luz.

Como se verifica, a poupança tende a diminuir quando a profundidade da sala aumenta. O aumento da área e consequente maior potência instalada para as mesmas fontes de luz natural explicam este comportamento. Esta tendência é menos acentuada nos dois últimos casos pois, é nestes que, a utilização de um tubo de luz não é suficiente para cumprir o objetivo mínimo.

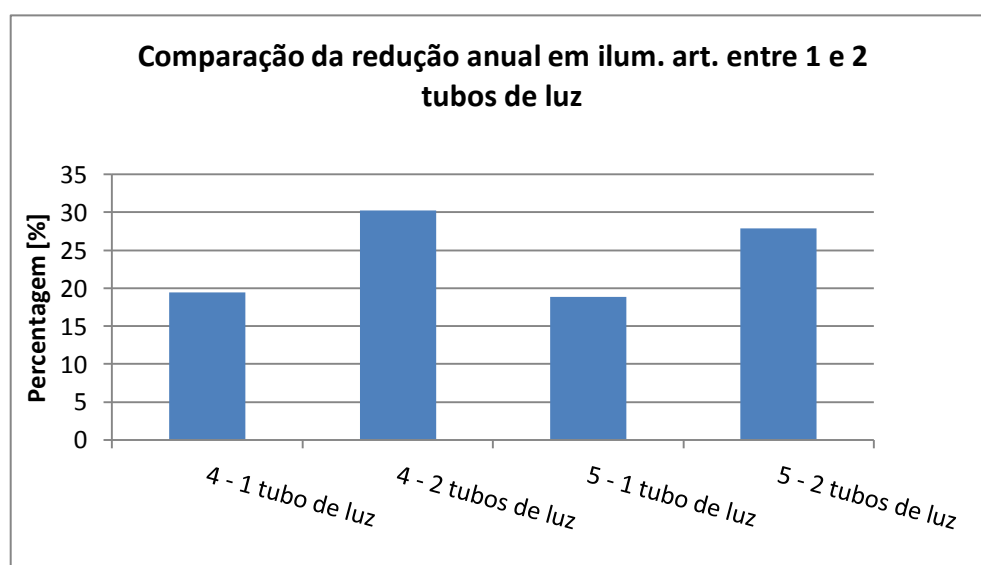


Figura 43: Resultados obtidos com a introdução do segundo tubo de luz.

Na figura 43 são apresentados os resultados obtidos quando se insere o segundo tubo de luz nas salas 4 e 5. Como era de esperar, ao introduzir-se outra fonte de luz natural, o número de luminárias ligadas que são necessárias para cumprir o limite imposto diminui, provocando uma maior redução na energia aliada à iluminação artificial.

Resumindo, pode-se afirmar que é possível alcançar uma poupança de cerca 25% em iluminação artificial ao usar-se um tubo de luz, ao que acresce aproximadamente dez pontos percentuais com a introdução de um segundo tubo de luz.

5.2. Energia consumida no sistema de climatização

Após a realização de todas as simulações no software TRNSYS, apresentam-se nos gráficos seguintes, os resultados obtidos para as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento como, também, o consumo energético associado à iluminação artificial.

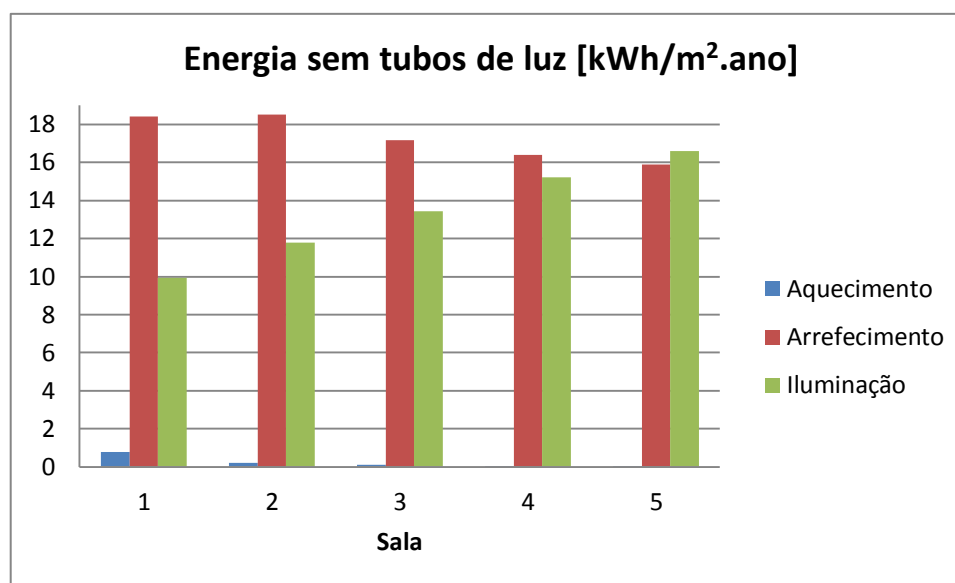


Figura 44: Energia consumida no sistema de climatização e iluminação artificial sem tubos de luz.

Verifica-se que existe muito pouca necessidade de aquecer todas as salas, o que era previsível, por se trata de escritórios onde existem muito ganhos internos, nomeadamente relacionados com os equipamentos.

Observa-se ainda uma clara tendência de aumento de iluminação artificial à medida que a profundidade da sala também aumenta, o que era previsto dado o aumento da proporção de iluminação artificial em relação ao ganho de luz natural.

Quanto às necessidades de arrefecimento, percebe-se que essas, a partir da sala 2, vão diminuindo à medida que o tamanho da sala aumenta. Numa primeira análise, devia-se obter o resultado oposto visto que o aumento de iluminação artificial provocaria uma maior necessidade de energia para arrefecer a sala.

Na realidade, embora haja um aumento de iluminação artificial, os ganhos pela envolvente e pelos ocupantes decrescem, por metro quadrado, à medida que a área aumenta (os ganhos por equipamentos mantem-se constantes), traduzindo-se na diminuição das necessidades de arrefecimento que aqui se constata.

Da sala 1 para a 2, já não se verifica a diminuição das necessidades de arrefecimento mas, sim, um ligeiro aumento porque, neste caso, a única componente de ganhos térmicos que diminui é a que provem da envolvente exterior.

De seguida apresentam-se, através do gráfico da figura 45, os resultados obtidos quando se introduz um tubo de luz.

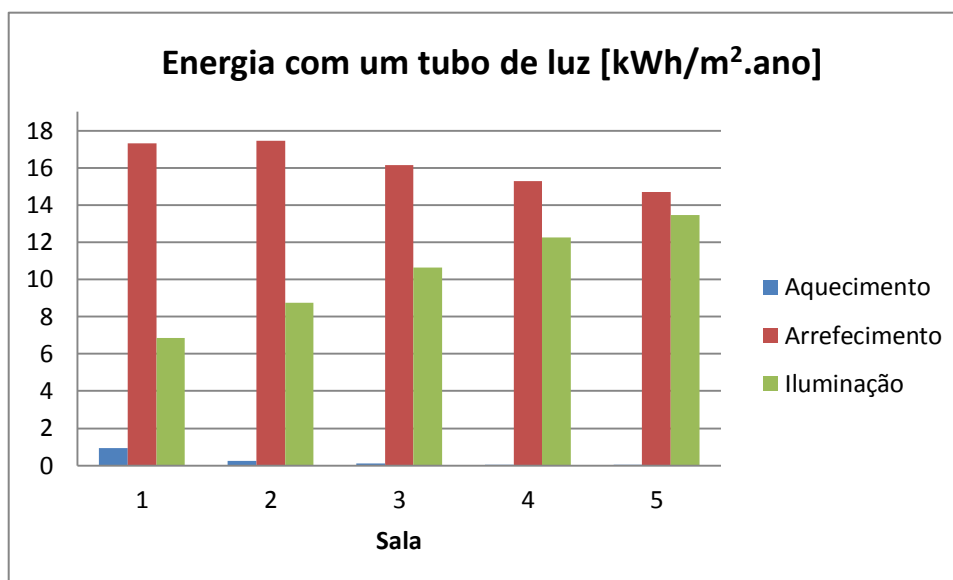


Figura 45: Energia consumida no sistema de climatização e iluminação artificial com tubos de luz.

Após introdução dos tubos de luz, nota-se um ligeiro aumento das necessidades energéticas de aquecimento proveniente da diminuição de ganhos internos relativos à iluminação. Embora seja um aumento, o seu impacto é praticamente inexistente dada a grandeza dos valores do consumo energético de iluminação artificial e das necessidades de arrefecimento.

À medida que a profundidade das salas em estudo aumenta, observa-se um decréscimo nas necessidades de arrefecimento, o que era previsto pois, com a introdução dos tubos de luz, a carga de iluminação diminui, não sendo necessário tanta energia para arrefecer o espaço.

No gráfico da figura 46, apresentam-se as respetivas reduções, em percentagem, apenas das necessidades de arrefecimento provenientes da introdução de tubos de luz, por serem estas que mais oscilam com a introdução dos mesmos.

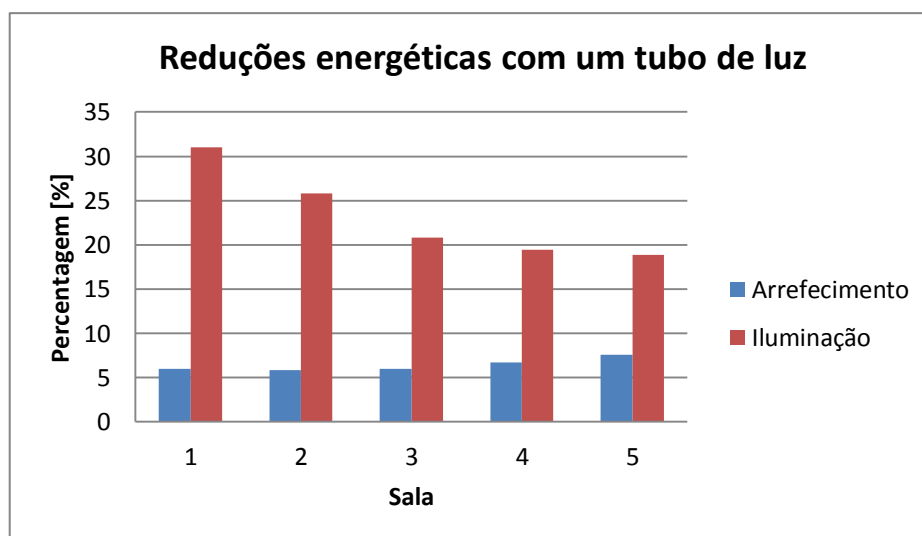


Figura 46: Reduções das necessidades de arrefecimento e do consumo energético em iluminação artificial obtidas pela introdução de um tubo de luz.

Como se observa, a poupança energética relativamente às necessidades de arrefecimento aumenta ligeiramente a par do aumento da área, apesar das reduções energéticas em iluminação artificial tenderem no sentido contrário. Este resultado é obtido devido ao efeito da inércia térmica do edifício em questão – inércia forte. Esta induz uma maior capacidade de retenção da temperatura interna, definida para o Verão, à medida que a área da sala aumenta. Desta forma, a amplitude das oscilações da temperatura interior é cada vez menor, facilitando o arrefecimento da sala e, consequentemente, aumentar a poupança de energia.

A partir destes resultados percebe-se que a inércia térmica de um edifício tem um papel fundamental no consumo de energia nos sistemas de climatização. Assim, é possível reduzir as necessidades de arrefecimento com a introdução de um tubo de luz, não só, pela diminuição direta de iluminação artificial, mas também, indiretamente, devido ao efeito da inércia térmica do edifício.

O gráfico da figura 47 mostra os resultados obtidos com a introdução do segundo tubo de luz nas salas 4 e 5.

Como seria de esperar, ao reduzir os ganhos internos associados à iluminação artificial, devido à introdução do segundo tubo de luz, a energia despendida para arrefecer cada sala é inferior, promovendo assim uma maior poupança relativamente à conseguida com apenas um tubo de luz.

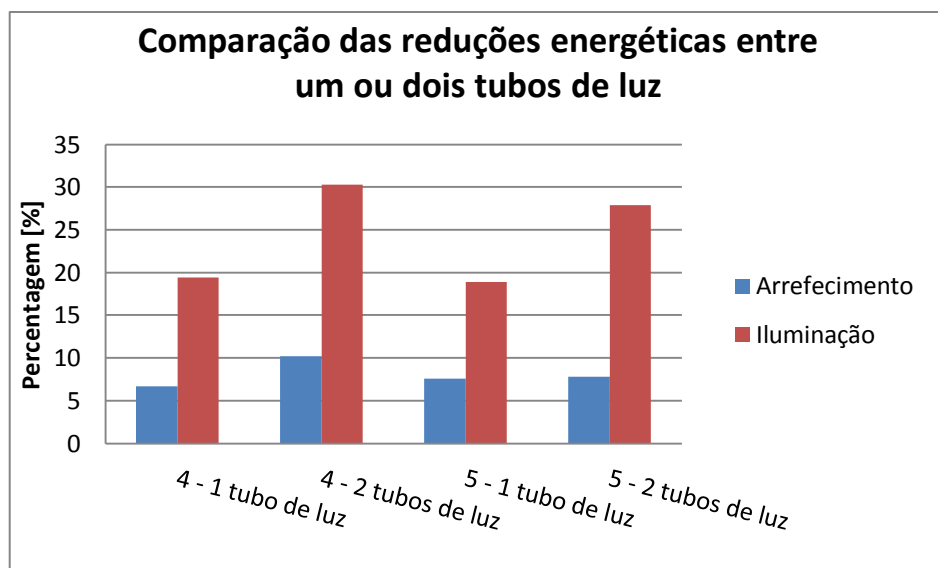


Figura 47: Influência da introdução do segundo tubo de luz nas necessidades de arrefecimento.

Observando-se os valores obtidos na sala 5, percebe-se que, ao instalar o segundo tubo de luz, a redução de energia de arrefecimento não aumenta tanto quanto acontece na sala 4. Isto poderá dever-se ao fato da redução de iluminação artificial obtida com o segundo tubo de luz, para a área da sala em causa, já não ser muito significativo.

Em resumo, ao utilizar-se um tubo de luz, a redução energética anual conseguida no arrefecimento andará entre 7,5% e 5,8%. A introdução de um segundo tubo de luz nas duas salas de maior profundidade, provou aumentar um pouco a poupança energética em arrefecimento – entre 1 e 3 pontos percentuais.

5.3. Energia global consumida

Na posse dos resultados obtidos para a iluminação artificial e sistema de climatização, converteram-se as respetivas contribuições em quilogramas equivalentes de petróleo. Os fatores de conversão para energia primária que se utilizaram foram os propostos no RCCTE. [32]

Os diagramas das duas figuras 48 e 49, representam a repartição dos pesos das diferentes componentes associadas ao consumo energético relativamente à sala 1, com e sem a influência de um tubo de luz. Os resultados para as outras salas em estudo encontram-se no anexo D.

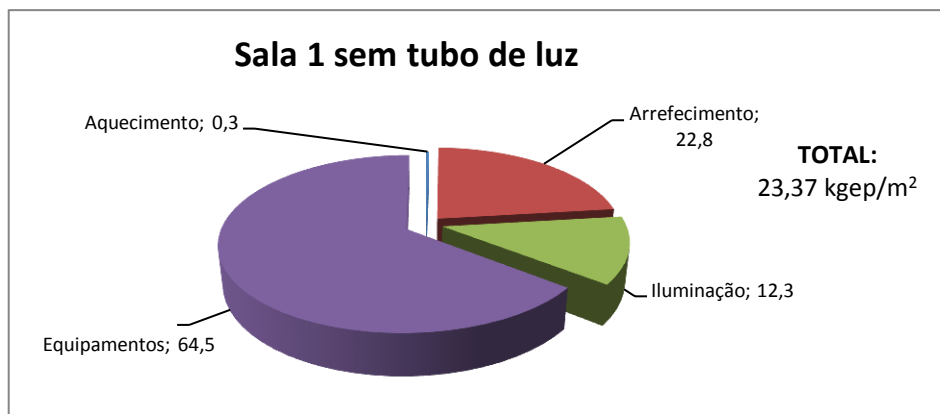


Figura 48: Repartição da energia consumida na sala 1 sem tubos de luz.

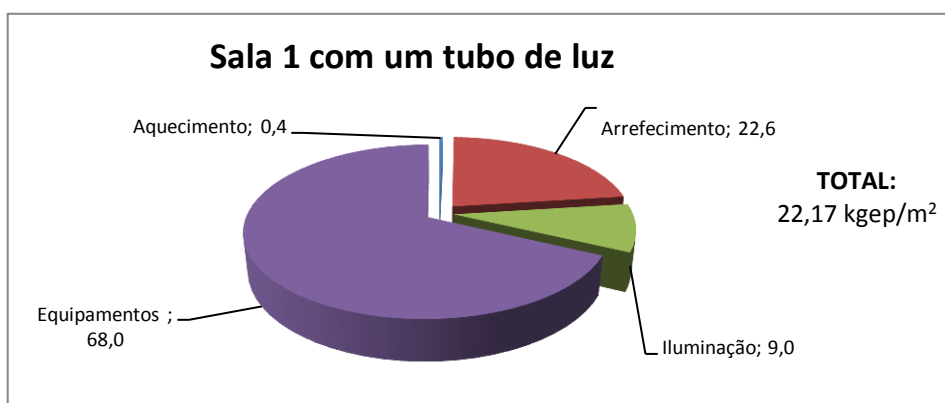


Figura 49: Repartição da energia consumida na sala 1 com um tubo de luz.

Previsivelmente, sempre que se introduz um tubo de luz, as componentes energéticas referentes à iluminação e arrefecimento diminuem.

Depois de somadas todas as componentes energéticas, apresentam-se através do gráfico da figura 50, as reduções, em percentagem, de energia total despendida para as salas em estudo ao introduzir-se um tubo de luz.

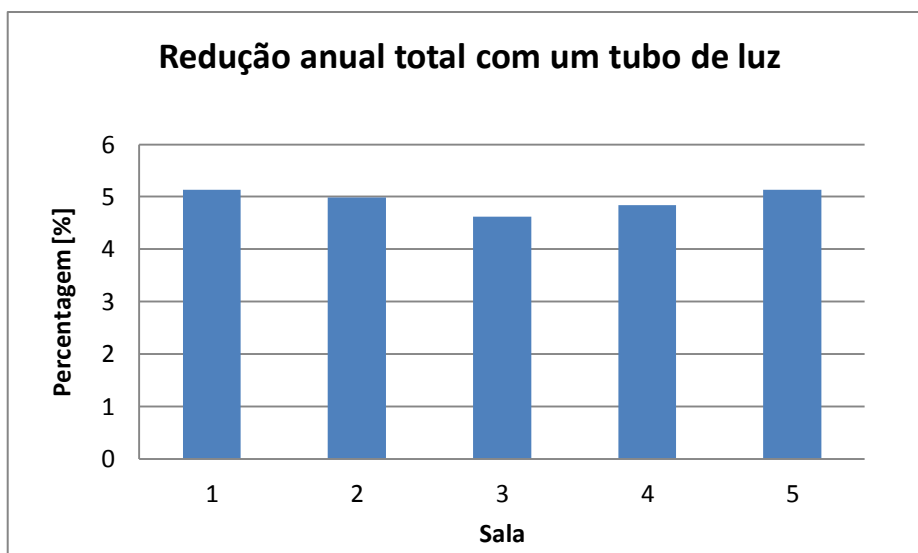


Figura 50: Poupança energética no consumo global anual com a introdução de um tubo de luz.

Pode-se, então, afirmar que para as salas em estudo, com um tubo de luz, se consegue poupar cerca de **5 %** do consumo energético global de um escritório.

Da mesma forma, o gráfico da figura 51 mostra a redução da utilização de energia proveniente da introdução do segundo tubo de luz nas salas 4 e 5.

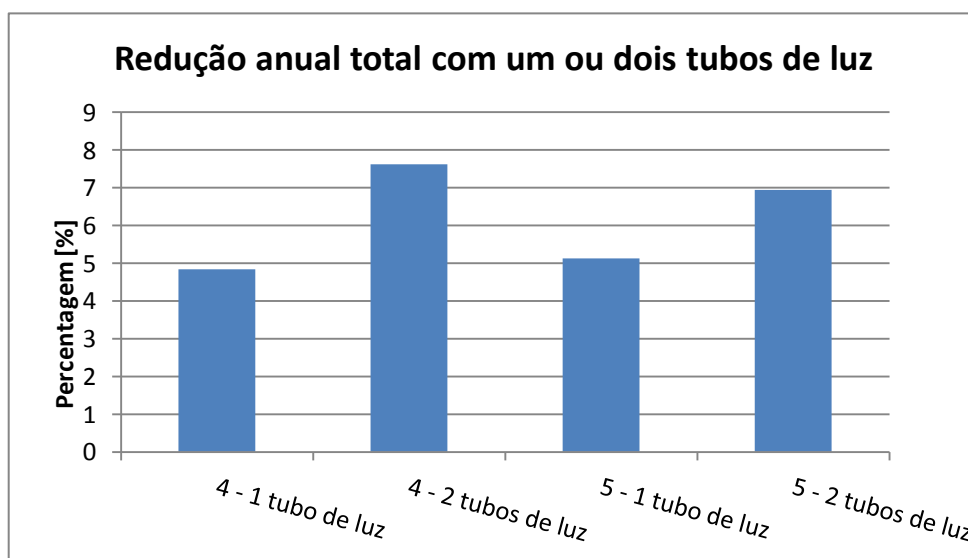


Figura 51: Influência da introdução do segundo tubo de luz na energia global consumida.

Da sua análise, constata-se um aumento de cerca de dois pontos percentuais na poupança energética ao utilizar-se o segundo tubo de luz.

6. Conclusões e trabalhos futuros

O presente trabalho teve como objetivo avaliar, de forma quantitativa e qualitativa, a influência de dispositivos de iluminação natural num espaço do tipo escritórios. Teve-se o cuidado em analisar espaços com várias profundidades por ser um fator de impacto significativo na difusão da iluminação num espaço, que apenas tem uma janela no topo da sala.

Tendo em conta as limitações decorrentes da utilização do software DIALUX, que não se encontra devidamente preparado para lidar com o fenómeno de iluminação artificial simultaneamente com a natural proveniente de tubos de luz, mesmo assim, foi possível determinar e estimar potenciais poupanças energéticas associadas a estes dispositivos.

6.1. Conclusões

Face às limitações resultantes do software de simulação (DIALUX) foi necessário efetuar um conjunto de limitações e adaptações para se conseguir obter os resultados pretendidos. As simulações ficaram limitadas no tempo, apenas foram considerados quatro tipos de condições de iluminação exterior; Inverno e Verão e para cada um, com e sem nuvens, dado o tempo disponível para realizar este trabalho. Desta forma, todos os consumos energéticos anuais determinados não corresponderão à realidade, embora permitam perceber que diferenças se obtêm com a utilização de tubos de luz.

Através do estudo efetuado e conforme era espectável, a utilização de tubos de luz proporciona uma redução do consumo energético no que diz respeito a iluminação artificial. Essa redução depende de vários fatores: a localização, a orientação e dimensões caracterizadoras do espaço, como também as dimensões, propriedades e posicionamento dos tubos de luz.

Ainda que o último fator referenciado no parágrafo anterior não tenha sido otimizado, para os casos de estudo presentes neste trabalho, foi determinada uma poupança anual de cerca 25% no consumo energético associado à iluminação artificial com a instalação de um tubo de luz. Com a introdução do segundo tubo de luz, mostrou-se que a poupança energética aumenta em cerca de dez pontos percentuais nas duas salas de maior profundidade.

Quanto às necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento, constatou-se, para as primeiras, um aumento desprezável tendo em conta a grandeza do valor do consumo associado ao arrefecimento. Com a utilização de um tubo de luz, a poupança energética anual no arrefecimento poderá ascender a 7,5% no caso mais favorável e 5,8% no pior caso. A introdução de um segundo tubo de luz nas duas salas de maior profundidade, não revelou grandes alterações na redução energética de arrefecimento – entre 1 e 3 pontos percentuais.

No consumo global de energia, conclui-se que é possível uma redução de aproximadamente 5% com a instalação de um tubo de luz e que, com a adição de um segundo tubo de luz, a poupança energética, apenas aumenta cerca de dois pontos percentuais.

6.2. Trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante repetir a presente análise deste trabalho com a fachada exterior dos escritórios virada para as outras três orientações. Assim, seria possível perceber que variações se obtinham ao comparar com os resultados aqui demonstrados para Sul. Com os resultados para as quatro orientações cardeais, poder-se-ia tentar gerar uma correlação entre as várias orientações. Desta forma, com o estudo realizado para apenas uma das orientações, se poderia estimar resultados noutras salas de outros edifícios com a fachada exterior orientada para qualquer um dos outros três pontos cardeais.

Dado ter sido uma das limitações deste trabalho, seria essencial desenvolver as ferramentas de simulação dinâmica de iluminação existentes, de forma a ser possível integrar tubos de luz para aproveitamento de luz natural sem grandes dificuldades.

No campo dos difusores de tubos de luz notou-se uma certa escassez de informação e, portanto, seria importante realizar um estudo sobre a performance destes dispositivos, tendo em conta propriedades de diferentes materiais, como também características geométricas, por exemplo, diferentes relevos e concavidades na sua superfície.

7. Bibliografia e referências

- [1] Jenkins, D., et al. (2003). "Modelling light-pipe performances - a natural daylighting solution." *Building and environment* 38(7): 965-972.
- [2] Illuminating Engineering Society of North America, "Lighting Handbook – Reference & Applications", 2000.
- [3] André de Herde e Sigrid Reiter, "L'éclairage naturel des bâtiments", 2001
- [4] Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (acedido pela última vez em 25 de Maio de 2013) [Online] [http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0213/Material de Apoio/03 - Ia. Conceito Fundamentais \(grandezas Luminosas\).pdf](http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0213/Material_de_Apoio/03_-_Ia_Conceito_Fundamentais_(grandezas_Luminosas).pdf)
- [5] Lightind Design Toolkit (acedido pela última vez em 01 de Junho de 2013) [Online] <http://www.arch.school.nz/tutorials/toolkit/tutorials/7redirect.html>
- [6] Paroncini, M., et al. (2007). "Monitoring of a light-pipe system." *Solar energy* 81(9): 1180-1186.
- [7] Chatron ® (acedido pela última vez em 01 de Junho de 2013) [Online] <http://www.chatron.pt/engine.php?cat=235>
- [8] Darula, S., et al. (2010). "Illumination of interior spaces by bended hollow light guides: Application of the theoretical light propagation method." *Solar energy* 84(12): 2112-2119.
- [9] T.R. Hamzah & Yeang Sdn Bhd, "Light Pipes: An Innovative Design Device for Bringing Natural Daylight and Illumination into Buildings with Deep Floor Plan (Patent Applied)", 2003;
- [10] Kocifaj, M., et al. (2008). "HOLIGILM: Hollow light guide interior illumination method - An analytic calculation approach for cylindrical light-tubes." *Solar energy* 82(3): 247-259.
- [11] Rosemann, A. and H. Kaase (2005). "Lightpipe applications for daylighting systems." *Solar energy* 78(6): 772-780.
- [12] Jenkins, D., et al. (2005). "Formulation of semi-empirical models for predicting the illuminance of light pipes." *Energy conversion and management* 46(13/14): 2288-2300.

- [13] Baroncini, C., et al. (2010). "Experimental analysis on a 1:2 scale model of the double light pipe, an innovative technological device for daylight transmission." *Solar energy* 84(2): 296.
- [14] Canziani, R., et al. (2004). "Daylight and energy performances of a new type of light pipe." *Energy and buildings* 36(11): 1163-1176.
- [15] Louçano, Nelson Ramos. (2009), Eficiência energética em edifícios: Gestão do sistema iluminação, Relatório de estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial no Instituto Politécnico de Bragança.
- [16] RADIACE (acedido pela última vez em 26 de Junho de 2013) [Online] <http://radsite.lbl.gov/radiance/framew.html>
- [17] Characteristic Features of ADELIN 1.0 (acedido pela última vez em 26 de Junho de 2013) [Online] <http://radsite.lbl.gov/adeline/features.html>
- [18] Hitchcock, R. J. (1995) "Advancing Lighting and Daylighting Simulation: The Transition from Analysis to Design Aid Tools". Lawrence Berkeley Laboratory
- [19] ADELIN (acedido pela última vez em 26 de Junho de 2013) [Online] <http://www.iea-adeline.de/index.html>
- [20] RELUX ® (acedido pela última vez em 26 de Junho de 2013) [Online] <http://www.relux.biz/>
- [21] http://www.dial.de/DIAL/fileadmin/seminarBilder/DIALux%20Anwenderschulung/05_560x350.jpg
- [22] Jenkins, D., et al. (2005). "A design tool for predicting the performances of light pipes." *Energy and buildings* 37(5): 485.
- [23] Jenkins, D. and T. Muneer (2004). "Light-pipe prediction methods." *Applied energy* 79(1): 77-86.
- [24] Zhang, X. and T. Muneer (2000). "Mathematical model for the performance of light pipes." *International journal of lighting research and technology* 32(3): 141.
- [25] ESP-r (acedido pela última vez em 27 de Junho de 2013) [Online] <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>
- [26] Crawley, D. B., et al. (2001). "EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program." *Energy and buildings* 33(4): 319-331.
- [27] TRNSYS (acedido pela última vez em 27 de Junho de 2013) [Online] <http://www.trnsys.com/>
- [28] Reinhart, C. F. and J. Wienold (2011). "The daylighting dashboard - A simulation-based design analysis for daylight spaces." *Building and environment* 46(2): 386.
- [29] CEN, EN 15193:2007 Energy performance of buildings – Energy requirements for lighting, Brussels, Belgium, 2007

- [30] CEN, EN 12461-1:2002 Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places, Brussels, Belgium, 2002.
- [31] CEN, EN 13779:2007 Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems, Brussels, Belgium, 2007.
- [32] Ministério das obras Públicas, Transportes e Comunicações, Decreto-Lei n.º 80/2006, “Regulamento das Características e Comportamento Térmico dos Edifícios”, 2006;
- [33] Ministério das obras Públicas, Transportes e Comunicações, Decreto-Lei n.º 79/2006, “Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios”, 2006;
- [34] Eduardo Maldonado e José Luís Alexandre, “Actas das aulas da disciplina Climatização”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011
- [35] Meteonorm (acedido pela última vez em 01 de Junho de 2013) [Online] <http://www.meteonorm.com>

Tubos de luz, serão sistemas que permitem reduzir efetivamente o consumo energético? – um estudo exploratório

Anexo A: Verificação da sobreposição de dois efeitos luminosos

Tabela 21: Verificação da sobreposição da iluminação proveniente de uma janela vertical e uma horizontal.

Apenas a janela vertical				
	Posição [m]			Valor [lx]
Ponto nº	X	Y	Z	
1	1	3	0,8	918
2	2	3	0,8	365
3	3	3	0,8	178
4	4	3	0,8	108
5	5	3	0,8	76
6	1	2	0,8	1372
7	2	2	0,8	443
8	3	2	0,8	202
9	4	2	0,8	110
10	5	2	0,8	84
11	1	1	0,8	909
12	2	1	0,8	364
13	3	1	0,8	179
14	4	1	0,8	108
15	5	1	0,8	75

Apenas a janela horizontal				
	Posição [m]			Valor [lx]
Ponto nº	X	Y	Z	
1	1	3	0,8	137
2	2	3	0,8	278
3	3	3	0,8	567
4	4	3	0,8	804
5	5	3	0,8	670
6	1	2	0,8	159
7	2	2	0,8	326
8	3	2	0,8	734
9	4	2	0,8	1115
10	5	2	0,8	887
11	1	1	0,8	137
12	2	1	0,8	275
13	3	1	0,8	566
14	4	1	0,8	813
15	5	1	0,8	668

Soma da janela horizontal com vertical				
	Posição [m]			Valor [lx]
Ponto nº	X	Y	Z	
1	1	3	0,8	1055
2	2	3	0,8	643
3	3	3	0,8	745
4	4	3	0,8	912
5	5	3	0,8	746
6	1	2	0,8	1531
7	2	2	0,8	769
8	3	2	0,8	936
9	4	2	0,8	1225
10	5	2	0,8	971
11	1	1	0,8	1046
12	2	1	0,8	639
13	3	1	0,8	745
14	4	1	0,8	921
15	5	1	0,8	743

Diferença	
Valor [lx]	Porcentagem
7	0,67%
4	0,63%
5	0,68%
4	0,44%
3	0,40%
11	0,72%
5	0,65%
5	0,54%
5	0,41%
4	0,41%
7	0,67%
5	0,79%
5	0,68%
4	0,44%
3	0,41%

Simulação das duas janelas em simultâneo				
	Posição [m]			Valor [lx]
Ponto nº	X	Y	Z	
1	1	3	0,8	1048
2	2	3	0,8	639
3	3	3	0,8	740
4	4	3	0,8	908
5	5	3	0,8	743
6	1	2	0,8	1520
7	2	2	0,8	764
8	3	2	0,8	931
9	4	2	0,8	1220
10	5	2	0,8	967
11	1	1	0,8	1039
12	2	1	0,8	634
13	3	1	0,8	740
14	4	1	0,8	917
15	5	1	0,8	740

Tabela 22: Verificação da sobreposição da iluminação proveniente de duas luminárias em duas posições diferentes.

Luminária 1										Luminária 2					
	Posição [m]			Valor [lx]							Posição [m]			Valor [lx]	
Ponto nº	X	Y	Z								Ponto nº	X	Y		Z
1	1	3	0,8	17							1	1	3	0,8	174
2	2	3	0,8	72							2	2	3	0,8	331
3	3	3	0,8	172							3	3	3	0,8	171
4	4	3	0,8	331							4	4	3	0,8	72
5	5	3	0,8	174							5	5	3	0,8	17
6	1	2	0,8	19							6	1	2	0,8	251
7	2	2	0,8	93							7	2	2	0,8	548
8	3	2	0,8	248							8	3	2	0,8	248
9	4	2	0,8	548							9	4	2	0,8	93
10	5	2	0,8	251							10	5	2	0,8	19
11	1	1	0,8	17							11	1	1	0,8	174
12	2	1	0,8	72							12	2	1	0,8	331
13	3	1	0,8	172							13	3	1	0,8	171
14	4	1	0,8	331							14	4	1	0,8	72
15	5	1	0,8	174							15	5	1	0,8	17

Soma luminária 1 mais luminária 2										Simulação das luminárias 1 e 2 em simultaneo						
	Posição [m]			Valor [lx]	Diferença							Posição [m]			Valor [lx]	
Ponto nº	X	Y	Z		Valor [lx]	Porcentagem						Ponto nº	X	Y		Z
1	1	3	0,8	191	0,0	0,0%						1	1	3	0,8	191
2	2	3	0,8	403	1,0	0,2%						2	2	3	0,8	404
3	3	3	0,8	343	0,0	0,0%						3	3	3	0,8	343
4	4	3	0,8	403	1,0	0,2%						4	4	3	0,8	404
5	5	3	0,8	191	0,0	0,0%						5	5	3	0,8	191
6	1	2	0,8	270	0,0	0,0%						6	1	2	0,8	270
7	2	2	0,8	641	0,0	0,0%						7	2	2	0,8	641
8	3	2	0,8	496	1,0	0,2%						8	3	2	0,8	497
9	4	2	0,8	641	0,0	0,0%						9	4	2	0,8	641
10	5	2	0,8	270	0,0	0,0%						10	5	2	0,8	270
11	1	1	0,8	191	0,0	0,0%						11	1	1	0,8	191
12	2	1	0,8	403	1,0	0,2%						12	2	1	0,8	404
13	3	1	0,8	343	0,0	0,0%						13	3	1	0,8	343
14	4	1	0,8	403	1,0	0,2%						14	4	1	0,8	404
15	5	1	0,8	191	0,0	0,0%						15	5	1	0,8	191

Tabela 23: Distribuição de iluminância do tubo de luz 1.

Tubo de luz 1																
3,5	108	130,2	157,1	189,2	227,1	270,8	319,7	372,2	425,4	475,1	516,1	543,3	553	543,7	516,8	426,5
3,25	117,9	143,4	174,6	212,6	258,1	311,5	372,3	438,9	507,5	572,5	627	663,6	676,7	664,1	628	508,8
3	127	155,7	191,3	235,1	288,4	352	425,7	507,7	593,6	676,4	746,5	794,1	811,2	794,7	747,7	595,2
2,75	134,9	166,4	206	255,2	315,9	389,2	475,5	573	676,6	777,8	864,7	924	945,3	924,7	866	678,3
2,5	141	174,8	217,5	271,2	338	419,7	516,8	627,7	747,1	865	967	1037	1062	1038	968,3	748,8
2,25	144,9	180,2	225	281,6	352,5	439,7	544,3	664,6	795	924,7	1038	1115	1144	1116	1039	796,5
2	146,2	182	227,6	285,3	357,6	446,9	554,1	677,8	812,4	946,4	1063	1144	1173	1144	1064	813,5
1,75	144,9	180,3	225,1	281,9	352,8	440,2	544,9	665,4	796	925,9	1039	1117	1145	1117	1039	796,7
1,5	141,2	175	217,9	271,7	338,7	420,5	518	629,2	749	867,1	969,3	1039	1064	1039	969,4	749,2
1,25	135,1	166,8	206,4	255,8	316,7	390,4	477,1	574,9	679	780,5	867,5	926,7	947,7	926,6	867,3	678,9
1	127,3	156,1	191,8	235,8	289,4	353,3	427,4	509,8	596,1	679,2	749,5	797	813,7	796,8	749,2	595,8
0,75	118,2	143,8	175,2	213,4	259,1	312,8	374	441	509,9	575,3	629,8	666,3	679,1	666,1	629,5	509,6
0,5	108,3	130,7	157,6	190	228,1	272,1	321,3	374,1	427,6	477,5	518,6	545,7	555,2	545,6	518,3	427,2
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75

Tabela 24: Distribuição de iluminância do tubo de luz 2.

Tubo de luz 2																		
3,5	319,7	372,2	425,4	475,1	516,1	543,3	553	543,7	516,8	476	426,5	373,3	320,7	271,7	227,8	189,8	157,6	
3,25	372,3	438,9	507,5	572,5	627	663,6	676,7	664,1	628	573,8	508,8	440,2	373,5	312,5	258,9	213,3	175,2	
3	425,7	507,7	593,6	676,4	746,5	794,1	811,2	794,7	747,7	677,8	595,2	509,2	427	353,1	289,3	235,8	191,9	
2,75	475,5	573	676,6	777,8	864,7	924	945,3	924,7	866	779,5	678,3	574,6	477	390,4	316,8	256	206,5	
2,5	516,8	627,7	747,1	865	967	1037	1062	1038	968,3	866,6	748,8	629,3	518,2	420,8	338,9	272	218,1	
2,25	544,3	664,6	795	924,7	1038	1115	1144	1116	1039	926,1	796,5	666	545,5	440,8	353,3	282,3	225,5	
2	554,1	677,8	812,4	946,4	1063	1144	1173	1144	1064	947,4	813,5	679	555,1	447,8	358,3	285,9	228	
1,75	544,9	665,4	796	925,9	1039	1117	1145	1117	1039	926,5	796,7	666,1	545,6	440,8	353,4	282,3	225,5	
1,5	518	629,2	749	867,1	969,3	1039	1064	1039	969,4	867,3	749,2	629,6	518,3	420,9	339	272	218,1	
1,25	477,1	574,9	679	780,5	867,5	926,7	947,7	926,6	867,3	780,4	678,9	574,9	477,2	390,6	316,9	256	206,6	
1	427,4	509,8	596,1	679,2	749,5	797	813,7	796,8	749,2	678,9	595,8	509,6	427,3	353,3	289,4	235,9	191,9	
0,75	374	441	509,9	575,3	629,8	666,3	679,1	666,1	629,5	574,9	509,6	440,7	373,8	312,7	259,1	213,4	175,2	
0,5	321,3	374,1	427,6	477,5	518,6	545,7	555,2	545,6	518,3	477,1	427,2	373,8	321,1	271,9	228	189,9	157,6	
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	

Tabela 25: Soma das distribuições de iluminância do tubo de luz 1 com o tubo de luz 2.

Soma do tubo de luz 1 com o tubo de luz 2																		
3,5	427,7	502,4	582,5	664,3	743,2	814,1	872,7	915,9	942,2	951,1	942,6	916,6	873,7	815,4	744,6	665,8	584,1	
3,25	490,2	582,3	682,1	785,1	885,1	975,1	1049	1103	1135,5	1146,3	1135,8	1103,8	1050,2	976,6	886,9	787,1	684	
3	552,7	663,4	784,9	911,5	1034,9	1146,1	1236,9	1302,4	1341,3	1354,2	1341,7	1303,3	1238,2	1147,8	1037	913,6	787,1	
2,75	610,4	739,4	882,6	1033	1180,6	1313,2	1420,8	1497,7	1542,6	1557,3	1543	1498,6	1422,3	1315,1	1182,8	1035,5	884,8	
2,5	657,8	802,5	964,6	1136,2	1305	1456,7	1578,8	1665,7	1715,4	1731,6	1715,8	1666,3	1580,2	1458,8	1307,2	1138,6	966,9	
2,25	689,2	844,8	1020	1206,3	1390,5	1554,7	1688,3	1780,6	1834	1850,8	1834,5	1781	1689,5	1556,8	1392,3	1208,4	1022	
2	700,3	859,8	1040	1231,7	1420,6	1590,9	1727,1	1821,8	1876,4	1893,8	1876,5	1823	1728,1	1591,8	1422,3	1233,3	1041,5	
1,75	689,8	845,7	1021,1	1207,8	1391,8	1557,2	1689,9	1782,4	1835	1852,4	1835,7	1783,1	1690,6	1557,8	1392,4	1208,8	1022,2	
1,5	659,2	804,2	966,9	1138,8	1308	1459,5	1582	1668,2	1718,4	1734,4	1718,5	1668,6	1582,3	1459,9	1308,4	1139,3	967,3	
1,25	612,2	741,7	885,4	1036,3	1184,2	1317,1	1424,8	1501,5	1546,3	1560,9	1546,4	1501,6	1424,9	1317,2	1184,2	1036,4	885,5	
1	554,7	665,9	787,9	915	1038,9	1150,3	1241,1	1306,6	1345,3	1358,1	1345,3	1306,6	1241	1150,1	1038,6	914,8	787,7	
0,75	492,2	584,8	685,1	788,7	888,9	979,1	1053,1	1107,1	1139,4	1150,2	1139,4	1107	1052,9	978,8	888,6	788,3	684,8	
0,5	429,6	504,8	585,2	667,5	746,7	817,8	876,5	919,7	945,9	954,6	945,8	919,5	876,3	817,5	746,3	667	584,8	
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	

Tabela 26: Distribuição da iluminância do tubo de luz 1 e 2 em simultâneo.


Simulação dos dois tubos de luz em simultâneo																		
3,5	427,7	502,4	582,5	664,3	743,2	814,1	872,8	916	942,2	951,1	942,6	916,6	873,8	815,4	744,6	665,8	584	
3,25	490,2	582,3	682,1	785,1	885,1	975,1	1049	1103	1135	1146	1136	1104	1050	976,6	886,9	787	684	
3	552,7	663,4	784,9	911,5	1035	1146	1237	1302	1341	1354	1342	1303	1238	1148	1037	913,7	787	
2,75	610,4	739,4	882,6	1033	1181	1313	1421	1498	1543	1557	1543	1499	1422	1315	1183	1035	884,9	
2,5	657,8	802,5	964,7	1136	1305	1457	1579	1666	1715	1732	1716	1666	1581	1459	1307	1139	966,9	
2,25	689,1	844,7	1020	1206	1390	1555	1688	1781	1834	1851	1834	1781	1689	1557	1392	1208	1022	
2	700,3	859,9	1040	1232	1421	1591	1727	1822	1876	1894	1877	1823	1728	1592	1422	1233	1042	
1,75	689,8	845,7	1021	1208	1392	1557	1690	1782	1835	1852	1836	1783	1690	1558	1393	1209	1022	
1,5	659,1	804,3	966,8	1139	1308	1460	1582	1669	1718	1734	1719	1669	1583	1460	1308	1139	967,4	
1,25	612,2	741,7	885,4	1036	1184	1317	1425	1502	1546	1561	1546	1502	1425	1317	1184	1036	885,5	
1	554,7	665,9	787,9	915	1039	1150	1241	1307	1345	1358	1345	1307	1241	1150	1039	914,8	787,7	
0,75	492,2	584,8	685,1	788,6	888,9	979,1	1053	1107	1139	1150	1139	1107	1053	978,8	888,6	788,2	684,8	
0,5	429,6	504,8	585,2	667,4	746,6	817,8	876,5	919,7	945,9	954,6	945,8	919,6	876,3	817,5	746,2	667	584,9	
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	

Tabela 27: Diferença, em porcentagem, entre as tabelas 24 e 25.


Diferença em porcentagem																	
3,5	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,011%	0,011%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,011%	0,000%	0,000%	0,000%	0,017%
3,25	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,044%	0,026%	0,018%	0,018%	0,019%	0,000%	0,000%	0,013%	0,000%
3	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,010%	0,009%	0,008%	0,031%	0,022%	0,015%	0,022%	0,023%	0,016%	0,017%	0,000%	0,011%	0,013%
2,75	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,034%	0,015%	0,014%	0,020%	0,026%	0,019%	0,000%	0,027%	0,021%	0,008%	0,017%	0,048%	0,011%
2,5	0,000%	0,000%	0,010%	0,018%	0,000%	0,021%	0,013%	0,018%	0,023%	0,023%	0,012%	0,018%	0,051%	0,014%	0,015%	0,035%	0,000%
2,25	0,015%	0,012%	0,000%	0,025%	0,036%	0,019%	0,018%	0,022%	0,000%	0,011%	0,027%	0,000%	0,030%	0,013%	0,022%	0,033%	0,000%
2	0,000%	0,012%	0,000%	0,024%	0,028%	0,006%	0,006%	0,011%	0,021%	0,011%	0,027%	0,000%	0,006%	0,013%	0,021%	0,024%	0,048%
1,75	0,000%	0,000%	0,010%	0,017%	0,014%	0,013%	0,006%	0,022%	0,000%	0,022%	0,016%	0,006%	0,036%	0,013%	0,043%	0,017%	0,020%
1,5	0,015%	0,012%	0,010%	0,018%	0,000%	0,034%	0,000%	0,048%	0,023%	0,023%	0,029%	0,024%	0,044%	0,007%	0,031%	0,026%	0,010%
1,25	0,000%	0,000%	0,000%	0,029%	0,017%	0,008%	0,014%	0,033%	0,019%	0,006%	0,026%	0,027%	0,007%	0,015%	0,017%	0,039%	0,000%
1	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,010%	0,026%	0,008%	0,031%	0,022%	0,007%	0,022%	0,031%	0,000%	0,009%	0,038%	0,000%	0,000%
0,75	0,000%	0,000%	0,000%	0,013%	0,000%	0,000%	0,009%	0,009%	0,035%	0,017%	0,035%	0,000%	0,009%	0,000%	0,000%	0,013%	0,000%
0,5	0,000%	0,000%	0,000%	0,015%	0,013%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,011%	0,000%	0,000%	0,013%	0,000%	0,017%
m	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5

Anexo B: Catálogos fornecidos pela Chatron com propriedades dos tubos de luz

Cúpula



Guarantee



Solid sheets

PLEXIGLAS® GS

Clear 0F00

Valid from: 04/2009

Ref. No. 111-32

Guarantee Statements

We guarantee the following properties for the above product according to the conditions of this guarantee statement:

Yellowness			
Yellowness index	Climate zone: temperate	Climate zone: hot and dry	Climate zone: hot and humid
on delivery	max. 1	max. 1	max. 1
after 10 years	max. 1	max. 2	max. 3
after 30 years	max. 2	max. 4	max. 5

Light transmission			
Transmittance (τ_{vis})	Climate zone: temperate	Climate zone: hot and dry	Climate zone: hot and humid
on delivery	min. 90%	min. 90%	min. 90%
after 10 years	min. 89%	min. 88%	min. 87%
after 30 years	min. 87%	min. 86%	min. 84%

Rigidity		Strength	
Modulus of elasticity (E_t)	Climate zone: temperate	Tensile strength value (σ_{M})	Climate zone: temperate
on delivery	min. 2,900 MPa	on delivery	min. 65 MPa
after 10 years	min. 2,800 MPa	after 10 years	min. 60 MPa

Combustion behaviour
Colourless PLEXIGLAS® burns nearly smoke-free and produces no acutely toxic flue gases. PLEXIGLAS® is considered harmless in this respect. All product types and designs do not change their combustion behaviour within a 30-year period.

Guarantee: PLEXIGLAS® GS Clear 0F00

Explanations

Yellowness

Colourless, transparent PLEXIGLAS® has a yellowing value of 0–1 when new. Depending on product type and design, the yellowing value is only 4–7 delta higher after 30 years. The yellowing value is measured as per DIN 5036 on cleaned and polished specimens conditioned in a standardized climate at 23 °C/50 % RH until equilibrium is reached. (Note: Measurements of PLEXIGLAS® multi-skin sheets are made on the upper skin.)

Light transmission

Colourless PLEXIGLAS® has a light transmission when new of up to 92 % depending on product type and design. Depending on product type and design, light transmission is only 2–15 % lower after 30 years. The transmission factor $\tau_{0.65}$ is measured as per DIN 5036 on cleaned and polished specimens conditioned in a standardized climate at 23 °C/50 % RH until equilibrium is reached. The values guaranteed for PLEXIGLAS® grades other than Clear only apply to the temperate climate zone.

Rigidity

The modulus of elasticity E_t is determined in the tensile test according to ISO 527-2/1B at 23 °C as the average value measured on five specimens with parallel faces, which have been conditioned to the equilibrium state in the standard climate of 23 °C/50 % RH. The values guaranteed for PLEXIGLAS® only apply to the temperate climate zone.

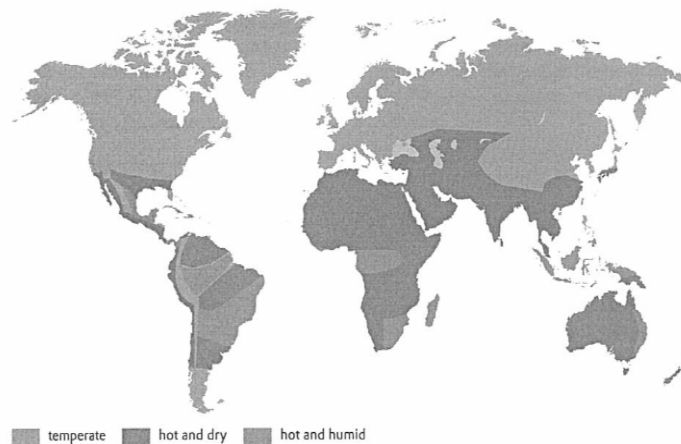
Strength

The tensile strength σ_M is determined in the tensile test according to ISO 527-2/1B at 23 °C as the average value measured on 5 specimens with parallel faces, which have been conditioned to the equilibrium state in the standard climate of 23 °C/50 % RH. The values guaranteed for PLEXIGLAS® only apply to the temperate climate zone.

Combustion behaviour

Light absorption by smoke is measured acc. to DIN 4101-1 Annex B. PLEXIGLAS® burns nearly smoke-free, i.e. light absorption by the smoke is < 15 %. The acute toxicity of flue gases is measured as per DIN 53436. The properties guaranteed for PLEXIGLAS® apply to all climate zones.

Climate zones





Guarantee: PLEXIGLAS® GS Clear 0F00

Terms of guarantee

Terms of guarantee, exclusions

All guarantee values shall be determined using cleaned specimens. In case of complex profiles, the measured values shall be determined on flat and plane-parallel specimen, since otherwise the material values cannot be determined with sufficient accuracy. Textured semi-finished goods – only on the more roughly textured side if both sides are textured – must be measured with the textured side facing the light source, at the original thicknesses. The products must have been stored, transported, processed, installed and used in accordance with the requirements of the subject materials. They must not have been thermally moulded or exposed to detrimental effects of harmful chemicals. For information on proper use, care and deployment of our products go to <http://www.plexiglas.net> on the internet and see the relevant print publications.

Duration of guarantee

This guarantee begins with the day of delivery to the end-user and expires upon deinstallation of the first application, intentional or wilful destruction, or 10 or 30 years from date of purchase. The shortest of the stated time spans applies in each case. Any guarantee claims shall exclusively be determined and governed by the version of this guarantee statement valid on the date of purchase of the material in question. The applicable version in each case is found at <http://www.plexiglas.net>.

In case of a guarantee claim

Any rights or claims raised hereunder shall be subject to the following,

- The user must present us a bill from the seller showing the name and address of the user, date of purchase, full product type/name and the product quantity so purchased.
- The guarantee claim must be submitted to us, during the term of this guarantee, in writing within 30 days.
- We ourselves must without delay be permitted to inspect the defect and its potential causes on site, or to have another party do so on our behalf.

Claims exclusively available hereunder

In case all terms and other conditions hereof are fulfilled such that the user has a valid claim hereunder we will replace the defective PLEXIGLAS® product ex works. If equivalent replacement material is no longer manufactured by us or can no longer be supplied, the user will receive a refund of the original purchase price. No other or further rights or claims of any kind shall be available hereunder.

Consumer rights, applicable law & jurisdiction

This guarantee does not affect or restrict any rights or claims specifically available to consumers under applicable law. This guarantee shall exclusively be governed by and construed under the laws of Germany, as applicable on the date of purchase of the goods in question, without giving effect to conflict of laws principles. The exclusive place of jurisdiction for any rights or claims from this guarantee shall be Darmstadt, Germany.

Evonik Röhm GmbH
Kirschenallee
64293 Darmstadt
Germany

* = registered trademark

PLEXIGLAS is a registered trademark of Evonik Röhm GmbH, Darmstadt, Germany.

Certified to DIN EN ISO 9001 (Quality) and DIN EN ISO 14001 (Environment)

This information and all further technical advice is based on our present knowledge and experience. However, it implies no liability or other legal responsibility on our part, also with regard to existing third party intellectual property rights, especially patent rights. In particular, no warranty, whether express or implied, or guarantee of product properties in the legal sense is intended or implied. We reserve the right to make any changes according to technological progress or further developments. The customer is not released from the obligation to conduct careful inspection and testing of incoming goods. Performance of the product described herein should be verified by testing, which should be carried out only by qualified experts in the sole responsibility of a customer. Reference to trade names used by other companies is neither a recommendation, nor does it imply that similar products could not be used.

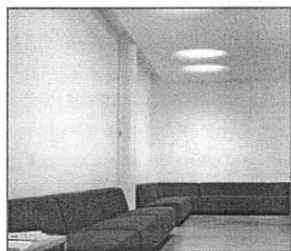
Ref. No. 111-32 April 2009
xx/0409/09680 (en)

Evonik Röhm GmbH
Kirschenallee, 64293 Darmstadt, Germany.
info@plexiglas.net www.plexiglas.net www.evonik.com



Tubo

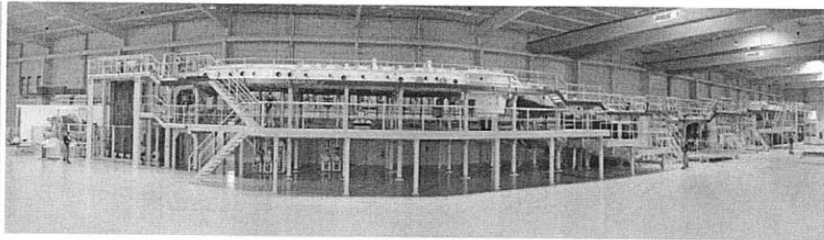
vega



Daylighting application



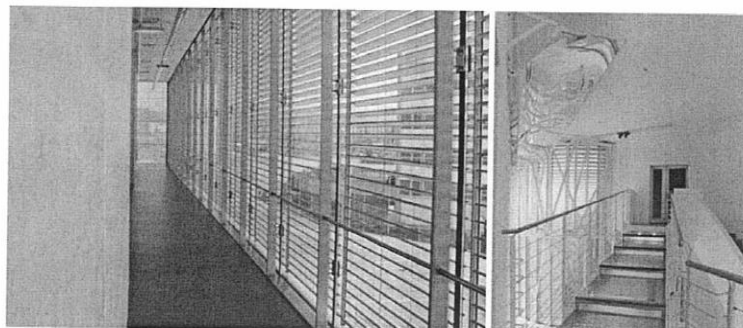
Daylighting Application



Almeco daylighting Daylighting systems take many forms, from grand architectural atria and light capturing apertures solutions and vaults to encapsulated reflective window blinds. One thing common to most of these systems is reflective material. Essential for re-directing and distributing light, high reflectance materials are at the heart of almost every daylighting project. Thanks not only to its optical properties, which can be varied and shaped to give glare free efficiency, but also due to its ductility, lightness and resistance to corrosion, high reflectance Aluminium is used for interior and exterior daylight systems, both for light deflection and diffusion.

Architectural Efficient natural lighting starts with the basic architecture of a project, from the orientation and window daylighting layout to the inclusion of built-in rooflights. New build projects can also incorporate daylighting features vaults which illuminate the core of the building and whose efficiency and aesthetic appeal can be augmented by introducing large mirror reflectors to conserve and re-distribute the incoming light and help to smooth out variations in daylight quality as the sun's position changes. High reflectance **vega** aluminium is ideal for such applications due to its light weight and formability. An alternative approach is to mount curved mirrors on the building facades to collect natural light. These systems can become quite sophisticated with compound parabolic collectors used to create so-called anidolic systems. Almeo's **vega** WR193 is ideal for such outdoor applications.

Daylighting through windows is the traditional way of bringing light into a building but it can lead to high levels of glare and heat. Venetian blinds in the form of mirrors can easily be produced from **vega** reflective aluminium and these can be incorporated in advanced double glazing systems with variable blind angle to re-direct light where it is needed while avoiding direct glare. These systems, like the compound parabolic systems described above, can be used in combination with special reflective aluminium ceiling fixtures to re-distribute the light downwards into an office space. By using special coatings on the reverse side of a blind's lamellae, optical performance can be combined with thermal control for greater occupant comfort.



Daylighting system

Daylight reflector



Almeco's **vega₉₇₁₉₈** and **vega₉₈₂₉₈** have been developed specially for the energy saving market and in particular for light pipe applications. Almeco has adopted light pipe technology in its head office building in Milan, using **vega₉₇₁₉₈** to maximise efficiency in bringing light to its corridors. The ready formability of the **vega** material and its durability combined with its excellent optical characteristics to make it the material of choice for light pipe manufacturer.

Key optical properties It is clear that the higher the total reflectance of the material making up the light pipe, the better will in a light pipe be its output. What may not be quite so clear is the extent to which total reflectivity affects this. To understand this you need to consider the losses due to absorption of light. Quite simply, for each reflection from the surface, a 96% reflective surface will lose twice as much light by absorption as a 98% reflective surface. In a 15 inch diameter light pipe, with light reflecting perfectly internally at 45 degrees, there will be eight reflections in a straight 20 foot length. The 98% material will give 18% more light output than the 96% under these conditions. Almeco **vega₉₇₁₉₈** metal for light pipes typically has 98.5% total reflectance over the visible range and optimises output from any light pipe configuration.

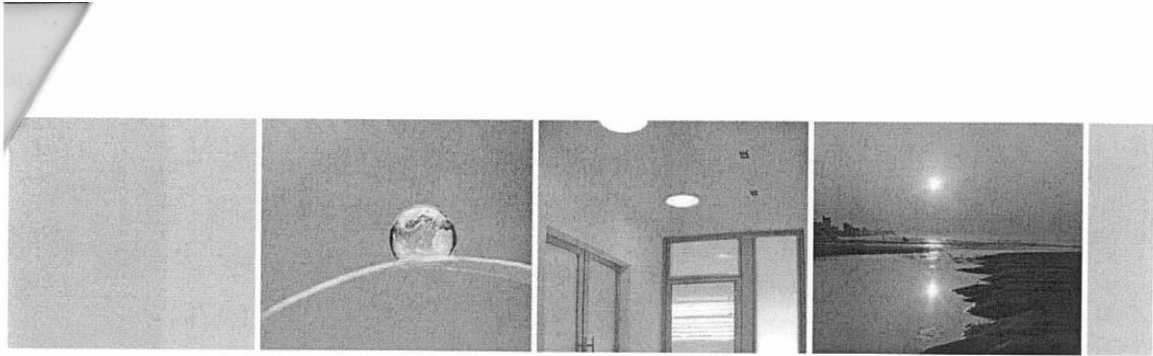
Mirror reflection is also important in a light pipe because scattering of the light by diffuse surfaces leads to more internal reflections and lower efficiency. The most important aspect of this is the limit of spread of diffuse reflection.

If light is scattered or diffused within a cone of a few degrees around the mirror reflection point, the effect on efficiency will be low. A small degree of diffusion can even soften the lighting effect and for artificial lighting technologies there are high reflectance materials made specially for this purpose. For high efficiency, **vega₉₇₁₉₈** surfaces direct 95% of the reflected light within a 2.5 degree cone of the mirror beam centre. Less precise competitive materials can give wider scattering of the light leading to much higher absorption and light losses. This is why high reflection paint coatings are not suitable for light pipes.



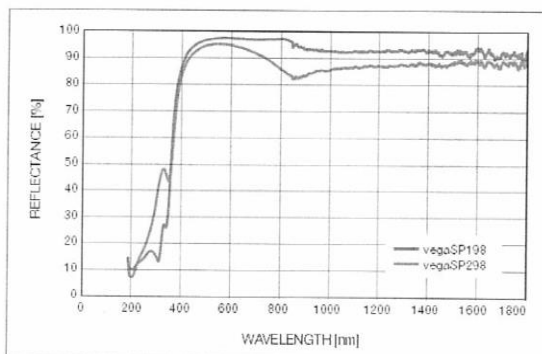
Roof with light pipes

Daylit interior

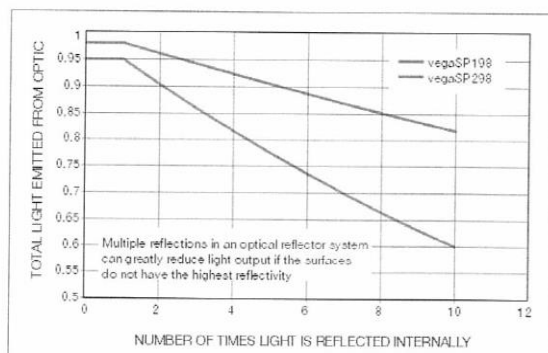


Maintained high reflection at different incident angles. The total reflectance of **vega_{SP198}** is usually measured according to the European standard (DIN 5036 part 3) which measures at <10 degrees from the vertical, at which angle total reflection values of about 98.5% are found. Measuring to the US specification ASTM E-1651 with the Technidyne TR2 instrument at 30 degrees from the vertical shows values of 99%. As the angle moves further away from the vertical the reflectance increases. This seems hardly possible with a 98.5% reflective product, but measurements of mirror reflection with specular gloss meters show that specular reflectance increases from 93% at 20 degrees from vertical to 100% at an angle of 85 degrees from the vertical.

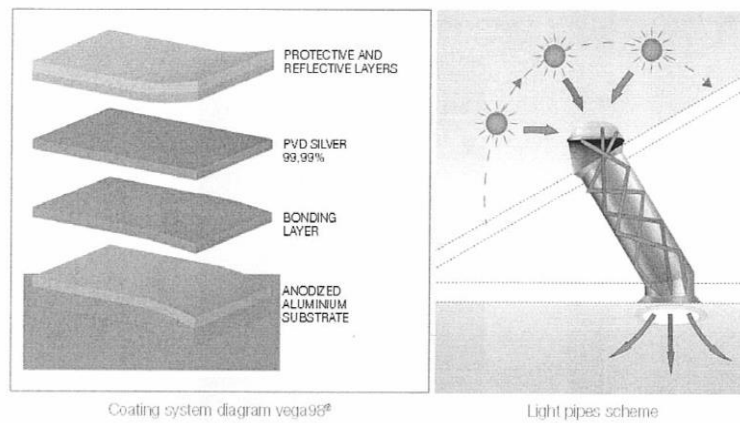
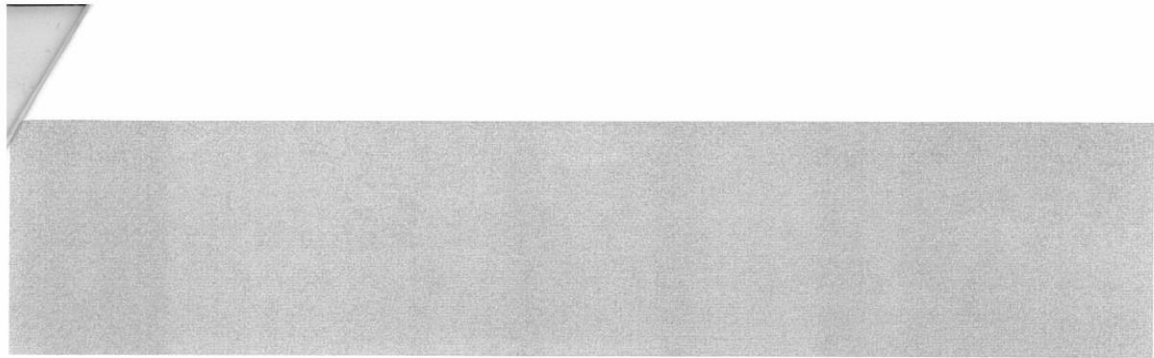
Colour. **vega_{SP198}** has a uniform spectral reflectance response over almost all of the visible range, with only a small lowering of reflectivity in the violet part of the spectrum. This leads to a neutral colour rendition with a slight tendency for yellow with light reflected in the tube at a shallow angle. L* a* b* coordinates are within 1% of neutral and remain so after prolonged accelerated UV tests.



Comparison of spectral reflectance curves for vegaSP198 vs vegaSP298 and pre-anodized specular aluminium



Graph showing reduction in light output with multiple reflections for 86%, 95% and 98% reflective materials



Reflectance characteristics	Total reflectance [%]		Specular reflectance [%]		Diffuse reflectance [%]
	ASTM E 1651	DIN 5036-3	60° long	60° trans	
vegaSP198	> 98	> 98	92	91	< 10
vegaSP298	> 98	> 98	93	93	< 7

Mechanical characteristics	Alloy	Reflection layer	Temper	Min. tensile strength	Min. proof stress (0.2%)	[%] Min. elongation
vegaSP198	1090	99.99% silver	H18	125	105	2
vegaSP298	1090	99.99% silver	H18	125	105	2

Durability tests	Test	Type	Standard	Duration	Reflectance before [%]	Reflectance after [%]	L*, a*, b*, values	
							before UV test	after UV test
Humidity resistance	40 °C 100%rh	ISO 6270 - 1	100h	98.0	97.8		99.8, - 0.1; +0.4	
UV resistance	65 °C xenon test	ISO 11341	1,000h	98.4	98.6		99.7, - 0.1; +0.5	

Milan, Italy - Bernburg, Germany
Goncelin, France - Atlanta, USA - Shenzhen, China



Almeco Group - Via della Liberazione 15
20098 San Giuliano M.se (Mi) - Italy
Ph. +39.02.988963.1 - Fax +39.02.988963.99
info.it@almecogroup.com - www.almecogroup.com

Difusor



Información técnica

PLEXIGLAS®

PLEXIGLAS® GS / XT

Características de aplicación de PLEXIGLAS®

PLEXIGLAS® GS	PLEXIGLAS® XT
De colada	Extrusionado
Totalmente incoloro y transparente	Totalmente incoloro y transparente
Resistente a la rotura y modificado al impacto (PLEXIGLAS® Resist)	Resistencia a la rotura y modificado al impacto (PLEXIGLAS® Resist 45-100)
Ingualable resistencia a la intemperie y al envejecimiento	Ingualable resistencia a la intemperie y al envejecimiento
Superficie de alta calidad y muy lisa: brillante, mate o grabada (PLEXIGLAS® Satinice)	Excelente superficie: brillante, mate o grabada (PLEXIGLAS® Satinice)
Planchas compactas, bloques, tubos, barras redondas y cuadradillos	Planchas compactas, tubos, barras redondas, planchas alveolares, planchas onduladas, planchas de espejo
Espesores compactos de 2 mm hasta 160 mm	Planchas compactas de 1,5 a 25 mm de espesor, planchas alveolares de 8 mm, 16 mm, 32 mm de espesor
Tamaño estándar de hasta 3.050 x 2.030 mm	Tamaño estándar 3.050 x 2.050 mm (+ longitudes extra)
Más de 40 colores estándar	Más de 20 colores estándar
Buena resistencia a los ácidos diluidos y a los alcalinos	Buena resistencia a los ácidos diluidos y a los alcalinos
Resistencia limitada a los disolventes orgánicos	Resistencia limitada a los disolventes orgánicos
Manipulación muy sencilla, similar a la madera dura	Manipulación sencilla, similar a la madera dura
Fácil de termoconformar en una amplia gama de elaboración	Fácil de termoconformar en condiciones óptimas e iguales
Pegado sencillo y firme, por ejemplo con adhesivos de reacción (par ex. ACRIFIX® 2R 0190, 1R 0192)	Pegado sencillo, por ejemplo con adhesivos disolventes (par ex. ACRIFIX® 1S 0116, 1S 0117)
Se quema de manera similar a la madera dura, con escasa emisión de humo; los gases desprendidos no son tóxicos ni corrosivos.	Se quema de manera similar a la madera dura, con escasa emisión de humo; los gases desprendidos no son tóxicos ni corrosivos.
Temperatura máxima de utilización de 80 °C aprox.	Temperatura máxima de utilización de 70 °C aprox.

Síntesis de las diferentes clases de PLEXIGLAS® y los grupos de productos correspondientes

PLEXIGLAS® GS	
PLEXIGLAS® GS 0F00 (233) Calidad estándar para planchas macizas de 2 a 25 mm de grosor, en gran parte impermeable a los rayos ultravioletas.	PLEXIGLAS® GS 0F00 (221, 222) Calidad estándar para bloques a partir de 30 mm de grosor, impermeable a los rayos ultravioletas.
PLEXIGLAS® LED (truLED) Calidades impermeables a los rayos ultravioletas, especialmente para retroiluminaciones, con propiedades optimizadas para LED, tal como transmisión máxima y dispersión luminosa ideal.	PLEXIGLAS® LED (EndLighten T) Especialidad transparente, impermeable a los rayos ultravioletas y difusión de la luz "hacia adelante", para anuncios luminosos extremadamente finos y objetos iluminados con bajo consumo de energía.
PLEXIGLAS® GS 0Z09 (209) Calidad especial, impermeable a la radiación ultravioleta, con elevada estabilidad dimensional bajo calor.	PLEXIGLAS® Resist Calidad especial de planchas macizas con alta resiliencia y reducida rigidez, con superficies brillantes o apagadas, impermeable a la radiación ultravioleta, para parabrisas de vehículos de dos ruedas, construcción de estanterías, instalaciones comerciales, vidrieras de protección etc.
PLEXIGLAS® GS 0F32 (232) Calidad estándar para tubos, impermeable a los rayos ultravioletas.	PLEXIGLAS® Satinice Calidades estándares, satinadas en una (SC) o de doble cara (DC), transparentes y coloridas para muebles, pantallas, publicidades luminosas y objetos iluminados.
PLEXIGLAS® Soundstop GS CC Calidad especial en planchas macizas, impermeable a los rayos ultravioletas, con hilos de poliamida, conforme a ZTV Lsw 06, EN 1793 y EN 1794 para paredes antirruido.	PLEXIGLAS® Soundstop GS Calidad especial en planchas macizas, impermeable a los rayos ultravioletas, conforme a ZTV Lsw 06, EN 1793 y EN 1794 para paredes antirruido.
PLEXIGLAS® GS 0A31 (231) Calidad especial, impermeable a la radiación ultravioleta, para aplicaciones que necesitan protección a los rayos ultravioletas y para zonas de alta irradiación solar.	PLEXIGLAS® GS 0Z18 (218) Calidad especial, permeable a los rayos ultravioletas, para exigencias elevadas (p. ej. para fibras ópticas).
PLEXIGLAS® GS 241, 245, 249 Calidades especiales, homologadas para el acristalamiento de aviones, impermeables a los rayos ultravioletas, con alta calidad óptica.	PLEXIGLAS® GS Colores Calidades estándares y especiales transparentes, translúcidas, apagadas, fluorescentes o policromas.
PLEXIGLAS® GS ¹ (SUNACTIVE) Calidades especiales incoloras y transparentes para camas solares, permeables y resistentes a los rayos ultravioletas.	Al grupo de nuestros productos de acrílico fundido corresponden también: PLEXIGLAS® Mineral (PLEXICOR®) Calidades especiales en planchas macizas y piezas moldeadas de acrílico, con aditivos minerales y coloración opaca, con diferentes decores para encimeras, elementos de muebles y instalaciones comerciales.
PLEXIGLAS® Hi-Gloss (MULTICOLOR) Calidades especiales en planchas macizas a partir de 9 mm de grosor, que se componen de dos o tres capas transparentes, translúcidas, opacas o fluorescentes con superficies brillantes, apagadas o estructuradas, para aplicaciones con fresados o efectos de cantos decorativos.	PARAPAN® Planchas macizas de acrílico, de brillo intenso y 18 mm de grosor principal, con colores opacos estándares o especiales, para frentes de muebles.
PLEXIGLAS® Textures (Grabado) Calidades estándares en planchas macizas incoloras y coloradas-transparentes, con superficies estructuradas para revestimientos de balcones, vidrieras decorativas y artículos de propaganda.	

¹ Patente europea EP 1 164 633

Sinopsis de las diferentes clases de PLEXIGLAS® y los grupos de productos correspondientes

PLEXIGLAS® XT	
PLEXIGLAS® XT 0A000 (20070) Calidad estándar en planchas macizas, en gran parte impermeable a los rayos ultravioletas.	PLEXIGLAS® Alltop SP ² Grupo de planchas alveolares con superficies que no forman gotas.
PLEXIGLAS® XT 0A000 (20070 HQ) Calidad especial en planchas macizas de alta calidad, idónea para elementos espejados, en gran parte impermeable a los rayos ultravioletas.	PLEXIGLAS® Heatstop XT / SP / WP ³ Calidad estándar de planchas macizas o alveolares con alta protección térmica, refleja los rayos infrarrojos, una capa de revestimiento protector NO DROP ⁴ dispersa el agua, y planchas onduladas para la construcción de tejados, exutorios, terrazas e invernaderos, absorbe la radiación ultravioleta.
PLEXIGLAS® XT 0A770 (24770) Calidad especial incolora, permeable y altamente resistente a los rayos ultravioletas para los cielos de camas solares, 3 mm de grosor como máximo.	
PLEXIGLAS® Resist SP / WP ⁵ Grupos de planchas alveolares de alta resistencia al impacto, con una capa de revestimiento protector NO DROP, planchas onduladas, resistentes a los rayos ultravioletas.	PLEXIGLAS® XT Colores Calidades estándares y especiales translucientes, opacas, policromas o metálicas.
PLEXIGLAS® UV 100 (Gallery) Familia de productos de calidades estándares con protección contra la radiación ultravioleta, para el acristalamiento de cuadros y obras expuestas.	PLEXIGLAS® LED (EndLighten) Especialidad con difusión de la luz "hacia adelante", para anuncios luminosos extremadamente finos con cantos iluminados y con bajo consumo de energía. Especialidad transparente, impermeable a los rayos ultravioletas y diffusion.
PLEXIGLAS® XT 0A070 (29070 bzw. 29080) Calidades estándares de planchas alveolares PLEXIGLAS® Alltop SDP 16 y de tubos y barras redondas; permeable a los rayos ultravioletas.	PLEXIGLAS® Optical (RP) Calidad de un material especial, satinada y colorada en gristransparente, con un performance particular especialmente para retroproyecciones.
PLEXIGLAS® Hi-Gloss Aspecto especialmente precioso y efecto en profundidad - estos son los rasgos de estas planchas macizas de brillo intenso, disponible en diferentes colores y decoros.	PLEXIGLAS® Reflections (Espejo, RADIANT) Planchas macizas atractivas brillantes y espejadas, con superficie metálica, brillante, satinada o en los colores del arco iris.
PLEXIGLAS® Resist 6 45, -65, -75, -100 Calidades estándares de planchas macizas con diferentes escalas de resiliencias más altas y rigideces reducidas, absorbe los rayos ultravioletas.	PLEXIGLAS® XT 0A370 (24370) Calidad especial de planchas macizas, permeable y altamente resistente a los rayos ultravioletas (p. ej. para invernaderos, azoteas).
PLEXIGLAS® Soundstop XT ⁷ Calidades especiales que absorben los rayos ultravioletas, corresponden a ZTV-Lsw 06, EN 1793 y EN 1794 para paredes antirruido.	PLEXIGLAS® Satinice 0D010 DF: planchas con superficies satinadas en ambas caras, barras y tubos para lámparas, letreros y propaganda luminosa; SC, DC: Calidades estándares coextruidas, satinadas en una (SC) o en ambas (DC) caras, incoloras o coloras, y calidades especiales para el acristalamiento de cuadros, muebles, pantallas, publicidad y objetos luminosos.
PLEXIGLAS® Textures (Grabado) Planchas macizas en una multitud de superficies estructuradas clásicas en combinación con los colores actuales o con efecto de arco iris.	

² Patente europea EP 530 617

³ Patente europea EP 548 822

⁴ Patente europea EP 149 182

⁵ Patente europea EP 733 754

⁶ Patente europea EP 776 931

⁷ Patente europea EP 600 332

Valores indicativos de las propiedades (a 23 °C y 50 % de humedad relativa)

Propiedades mecánicas

	PLEXIGLAS® GS 0F00; 0F00; 0Z09 (233; 222; 209)	PLEXIGLAS® XT 0A000; 0A070 (20070; 29070)	PLEXIGLAS® Resist 45; 65; 75; 100	Unidad	Prueba estándar
Densidad	1,19	1,19	1,19	g/cm³	ISO 1183
Resistencia al impacto (Charpy)	15	15	45; 65; 75; sin roturas	kJ/m²	ISO 179/1fu
Resistencia al impacto (Izod con entalla)	1,6	1,6	2,5; 4,5; 6,0; 6,5	kJ/m²	ISO 180/1 A
Resistencia al impacto (Charpy con entalla)	-	-	3,5; 6,5; 7,5; 8,0	kJ/m²	ISO 179/1eA
Resistencia a la tracción σ_{tr}				MPa	ISO 527-2/1B/5
- 40 °C	110	100	-		
23 °C	80	72	60; 50; 45; 40		
70 °C	40	35	-		
Alargamiento a la rotura ϵ_{r}	5,5	4,5	-	%	ISO 527-2/1B/5
Alargamiento nominal a la rotura ϵ_{sn}	-	-	10; 15; 20; 25	%	ISO 527-2/1B/50
Resistencia a la flexión, muestra de prueba estándar (80 x 10 x 4 mm³)	115	105	95; 85; 77; 69	MPa	ISO 178
Tensión de fluencia comprimida σ_{cf}	110	103	-	MPa	ISO 604
Tensión del material permitida (hasta 40 °C)	5-10	5-10	5-10	MPa	-
Módulo de elasticidad E_{t} (valor a corto plazo)	3300	3300	2700; 2200; 2000; 1800	MPa	ISO 527-2/1B/1
Radio mínimo de curvado en frío permitido	330 x espesor	330 x espesor	270 x espesor; 210 x espesor; 180 x espesor; 150 x espesor	-	-
Módulo de cizallamiento a 10 Hz aproximadamente	1700	1700	-	MPa	ISO 537
Dureza de Indentación $H_{\text{981/30}}$	175	175	145; 130; 120; 100	MPa	ISO 2039-1
Resistencia al rayado después del método de ruedas abrasivas (100 U.; 5,4 N; CS-10F)	20-30	20-30	20-30; 30-40; 30-40; 30-40;	% bruma	ISO 9352
Coefficiente de fricción				-	-
plástico / plástico	0,8	0,8	-		
plástico / acero	0,5	0,5	-		
acero / plástico	0,45	0,45	-		
Coefficiente de Poisson (velocidad de dilatación del 5 % por min.; hasta 2 % de dilatación; a 23°C)	0,37	0,37	0,41; 0,42; 0,41; 0,43	-	ISO 527-1
Resistencia al impacto de disco según espesor (prueba certificada no de FMMA Stuttgart)	-	12 mm (46/900 549)	-6 ¹⁾ ; (6); 6 ²⁾ mm (¹⁾ 46/901 869/Sm/C; ²⁾ 46/901870/Sm/C)	-	similar al DIN 18 032, 3ª parte

Propiedades térmicas

	PLEXIGLAS® GS 0F00; 0F00; 0Z09 (233; 222; 209)	PLEXIGLAS® XT 0A000; 0A070 (20070; 29070)	PLEXIGLAS® Resist 45; 65; 75; 100	Unidad	Prueba estándar
Coefficiente dilatación térmica lineal de 0 - 50 °C	$7 \cdot 10^{-5}$ (= 0,07)	$7 \cdot 10^{-5}$ (= 0,07)	$7 \cdot 10^{-5}$; $8 \cdot 10^{-5}$; $9 \cdot 10^{-5}$; $11 \cdot 10^{-5}$ (0,07; 0,08; 0,09; 0,11)	1/K (mm/m °C)	DIN 53752-A
Dilatación posible por calor y humedad	5	5	5; 6; 6; 8	mm/m	-
Conductividad térmica	0,19	0,19	-	W/mK	DIN 52612
Coefficiente de transmisión de calor en espesores de				W/m²K	DIN 4701
1 mm	5,8	5,8	5,8		
3 mm	5,6	5,6	5,6		
5 mm	5,3	5,3	5,3		
10 mm	4,4	4,4	4,4		
Calor específico c	1,47	1,47	1,47	J/gK	-
Temperatura de moldeo	160 - 175	150 - 160	150 - 160; 140 - 150; 140 - 150; 140 - 150	°C	-
Temperatura máxima en superficie (radiación IR)	200	180	-	°C	-
Temperatura máxima de utilización permanente	80	70	70; 70; 70; 65	°C	-
Temperatura de inversión de moldeo	> 80; > 80; > 90	> 80; > 80	> 80; > 80; > 75; > 70	°C	-
Temperatura de ignición	425	430	-	°C	DIN 51794
Cantidad de gas de combustión	muy poca	muy poca	muy poca	-	DIN 4102
Toxicidad del gas de combustión	ninguna	ninguna	ninguna	-	DIN 53436
Corrosividad del gas de combustión	ninguna	ninguna	ninguna	-	-
Clase de material de construcción					DIN 4102
	B2	B2	B2	-	BS 476, parte 7 + 6
	Class 3	Class 3	-	-	BS 2782
	TP (b)	TP (b)	-	-	Método 508 A
	E	E	E	-	DIN EN 13501
Certificado general de examen de inspección urbanística	P-K017 / 11.06	P-K018 / 02.07	P-K019 / 05.07	-	-
Temperatura de reblandecimiento Vicat	115	103	102; 100; 100; 97	°C	ISO 306, Método B 50
Temperatura de deflexión bajo carga (HDT)				°C	ISO 75
deflexión 1,8 MPa	105; 105; 107	95	94; 93; 92; 90		
deflexión 0,45 MPa	113; 113; 115	100	99; 98; 96; 93		

Propiedades acústicas

	PLEXIGLAS® GS 0F00; 0F00; 0Z09 (233; 222; 209)	PLEXIGLAS® XT 0A000; 0A070 (20070; 29070)	PLEXIGLAS® Resist 45; 65; 75; 100	Unidad	Prueba estándar
Velocidad del sonido (a temperatura ambiente)	2700 - 2800	2700 - 2800	-	m/s	-
Índice de aislamiento contra ruidos aéreos R_w en los siguientes espesores				dB	-
4 mm	26	26	-		
6 mm	30	30	-		
10 mm	32	32	-		

Propiedades ópticas

	PLEXIGLAS® GS 0F00; 0F00; 0Z09 (233; 222; 209)	PLEXIGLAS® XT 0A000; 0A070 (20070; 29070)	PLEXIGLAS® Resist 45; 65; 75; 100	Unidad	Prueba estándar
Grado de transmisión de luz D65	~ 92	~ 92	~ 91	%	DIN 5036, 3ª parte
Permeabilidad a los rayos UV	no; no; no	no, sí	no; no; no; no	-	-
Pérdida de reflexión en el alcance de visibilidad (para cada superficie)	4	4	4	%	-
Grado total de paso de energía g	85	85	85	%	DIN EN 410
Absorción en el alcance de visibilidad	< 0,05	< 0,05	< 0,05	%	-
Índice de refracción n_{D20}	1,491	1,491	1,491	-	ISO 489

Propiedades eléctricas

	PLEXIGLAS® GS 0F00; 0F00; 0Z09 (233; 222; 209)	PLEXIGLAS® XT 0A000; 0A070 (20070; 29070)	PLEXIGLAS® Resist 45; 65; 75; 100	Unidad	Prueba estándar
Resistencia volúmica D	> 10^{15}	> 10^{15}	> 10^{14}	Ohm · cm	DIN VDE 0303, 3ª parte
Resistencia de superficie ROA	$5 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	> 10^{14}	Ohm	DIN VDE 0303, 3ª parte
Resistencia dieléctrica E_d (espesor de prueba de 1 mm)	~ 30	~ 30	-	kV/mm	DIN VDE 0303, 2ª parte
Constante dieléctrica					DIN VDE 0303, 4ª parte
a 50 Hz	3,6	3,7	-	-	
a 0,1 MHz	2,7	2,8	-	-	

Factor de disipación tan					DIN VDE 0303, 4ª parte
a 50 Hz	0,06	0,06	-	-	
a 0,1 MHz	0,02	0,02	-	-	
Seguimiento, valor CTI	600	600	-	-	DIN VDE 0303, 1ª parte

Comportamiento frente al agua

	PLEXIGLAS® GS 0F00; 0F00; 0Z09 (233; 222; 209)	PLEXIGLAS® XT 0A000; 0A070 (20070; 29070)	PLEXIGLAS® Resist 45; 65; 75; 100	Unidad	Prueba estándar
Absorción del agua (24 horas, 23 °C) desde estado seco; prueba 60 x 60 x 2 mm³	41	38	41; 45; 46; 49	mg	ISO 62, Método 1
Incremento máximo del peso en inmersión	2,1	2,1	2,1	%	ISO 62, Método 1
Permeabilidad al				g cm cm² h Pa	-
vapor de agua	2,3 · 10 ⁻¹⁰	2,3 · 10 ⁻¹⁰	-		
N2	4,5 · 10 ⁻¹⁵	4,5 · 10 ⁻¹⁵	-		
O2	2,0 · 10 ⁻¹⁴	2,0 · 10 ⁻¹⁴	-		
CO2	1,1 · 10 ⁻¹³	1,1 · 10 ⁻¹³	-		
Aire	8,3 · 10 ⁻¹⁵	8,3 · 10 ⁻¹⁵	-		

* = marca registrada PLEXIGLAS es una marca registrada de Evonik Röhm GmbH, Darmstadt, Alemania.
Certificado según DIN EN ISO 9001 (calidad) y DIN EN ISO 14001 (medio ambiente)

Evonik Industries es un fabricante a nivel mundial de productos PMMA que se venden en Europa, Asia, África y Australia bajo la marca registrada PLEXIGLAS® y en el continente americano bajo la marca ACRYLITE®.

Esta información y cualquier asesoramiento técnico posterior se basan en nuestros conocimientos y experiencia actuales. Sin embargo, no conlleva obligación alguna ni responsabilidad legal por nuestra parte, incluso en lo que respecta a los derechos de propiedad intelectual existentes de terceros, sobre todo derechos de patentes. En concreto, no se prevé ni sobreentiende ninguna garantía explícita o implícita, así como ninguna garantía sobre las propiedades del producto en el sentido legal. Nos reservamos el derecho de realizar cambios en función de la evolución tecnológica u otros avances. El cliente no está eximido de su obligación de inspeccionar y comprobar cuidadosamente los bienes entrantes. El funcionamiento del producto descrito en este documento deberá ser verificado mediante pruebas, que deberán ser realizadas únicamente por expertos cualificados bajo la responsabilidad exclusiva del cliente. Las alusiones a nombres comerciales empleados por otras compañías no constituyen una recomendación, ni significan que no puedan emplearse productos similares.

Evonik Industries AG
Acrylic Polymers
Kirschenallee, 64293 Darmstadt, Alemania
info@plexiglas.net www.plexiglas.net www.evonik.com

Nº ref. 211-1 Enero 2013

Evonik. Power to create.



Anexo C: Simulação no Trnsys – Necessidades Térmicas de Aquecimento e Arrefecimento

Para realizar a simulação das necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento são necessárias várias informações sobre o edifício em estudo bem como algumas considerações que se tiveram de definir.

O edifício, situado na cidade do Porto, foi qualificado com uma envolvente de inercia térmica forte, tendo sido a sala em estudo colocada numa zona central do edifício, sem proteções solares, de modo a que apenas a fachada exterior sofresse trocas de calor. Esta consideração teve como objetivo reduzir a influência de outros fatores que não a iluminação artificial.

Sobre a envolvente exterior, considerou-se homogénea de modo a não se considerar pontes térmicas planas e lineares, pois dada a natureza do trabalho, são pormenores sem grande relevância. Assim definiu-se a parede exterior com um coeficiente de transmissão térmica igual a $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Escolheu-se um envidraçado com caixilharia metálica sem corte térmico e vidro duplo incolor + incolor (4 a 8) mm + 5 mm sendo o coeficiente de transmissão térmica e fator solar, respetivamente, de $2,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ e 0,75.

Relativamente aos ganhos internos, foram utilizados os perfis de ocupação e de equipamentos propostos pelo Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) para a tipologia “Escritórios”. Estes podem ser vistos nas tabelas seguintes:

Tabela 28: Perfil de Ocupação [33]

horas	% de Ocupação	
	Segunda a sexta	Fins de semana
0h as 1h	0	0
1h as 2h	0	0
2h as 3h	0	0
3h as 4h	0	0
4h as 5h	0	0
5h as 6h	0	0
6h as 7h	10	0
7h as 8h	20	0
8h as 9 h	50	0
9h as 10h	90	0
10h as 11h	100	0
11h as 12h	100	0
12h as 13h	50	0
13h as 14h	70	0
14h as 15h	90	0
15h as 16h	100	0
16h as 17h	80	0
17h as 18h	50	0
18h as 19h	20	0
19h as 20h	10	0
20h as 21h	0	0
21h as 22h	0	0
22h as 23h	0	0
23h as 24h	0	0

Tabela 29: Perfil de Equipamentos [33]

horas	% de equipamento	
	Segunda a sexta	Fins de semana
0h as 1h	15	15
1h as 2h	15	15
2h as 3h	15	15
3h as 4h	15	15
4h as 5h	15	15
5h as 6h	15	15
6h as 7h	30	15
7h as 8h	70	15
8h as 9h	85	15
9h as 10h	95	15
10h as 11h	100	15
11h as 12h	95	15
12h as 13h	70	15
13h as 14h	70	15
14h as 15h	95	15
15h as 16h	100	15
16h as 17h	90	15
17h as 18h	70	15
18h as 19h	45	15
19h as 20h	25	15
20h as 21h	15	15
21h as 22h	15	15
22h as 23h	15	15
23h as 24h	15	15

Para as densidades de ocupação e de equipamentos, também foram usados os valores de referência do RSECE para a tipologia “Escritórios”, indicados na tabela seguinte:

Tabela 30: Densidade de Equipamentos e Ocupação [33]

Densidade de Equipamento	15W/m ²
Densidade de Ocupação	15m ² /ocupante

Visto a atividade dos ocupantes neste caso ser trabalho de escritório, foi usado o valor de 120W ou 1,2 Met para o ganho interno por ocupante. [34]

Os dados climáticos utilizados provêm da base de dados Meteonorm, disponível online em [35].

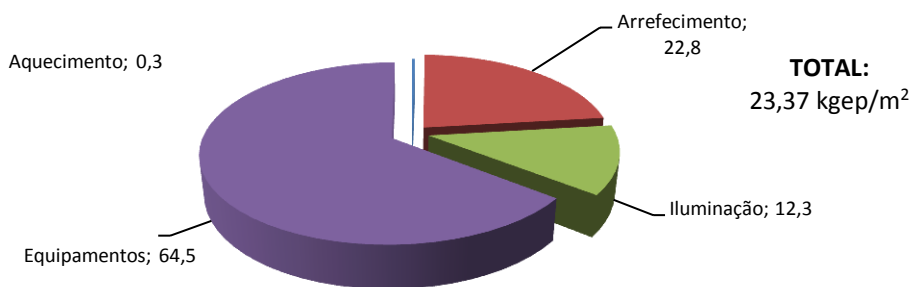
Foram consideradas infiltrações de 0,6 renovações por hora e definidas as temperaturas interiores para Verão e Inverno de 25 e 20°C respetivamente.

O sistema de aquecimento é aprovisionado de uma caldeira de combustível líquido, enquanto para o sistema de arrefecimento escolheu-se uma bomba de calor. O rendimento da caldeira e o COP da bomba de calor foram estabelecidos pelo que é proposto no RCCTE, ou seja, 0,8 e 3 respetivamente.

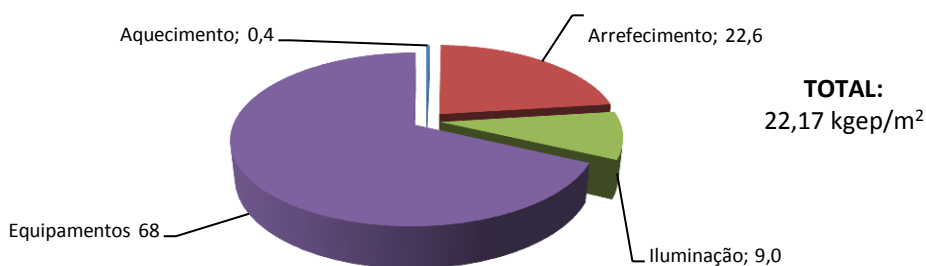
Anexo D: Repartição das diferentes componentes associadas ao consumo energético para as salas em estudo, sem e com tubos de luz.

Sala 1

Sala 1 sem tubo de luz

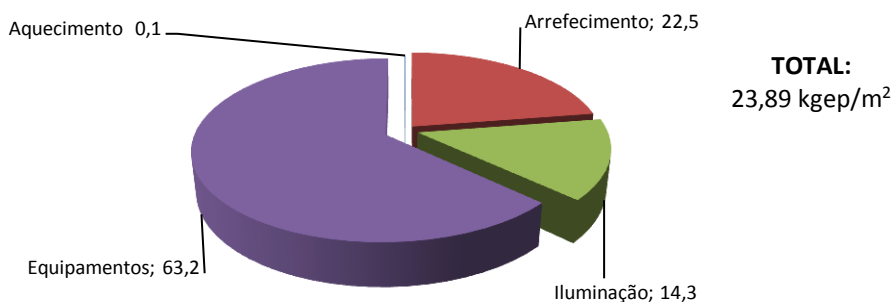


Sala 1 com um tubo de luz

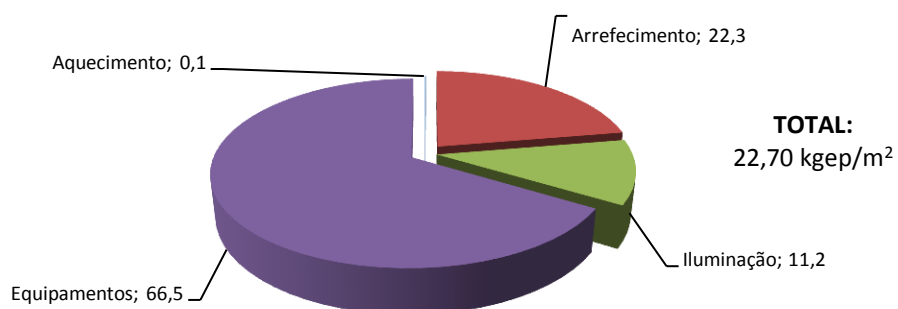


Sala 2

Sala 2 sem tubo de luz

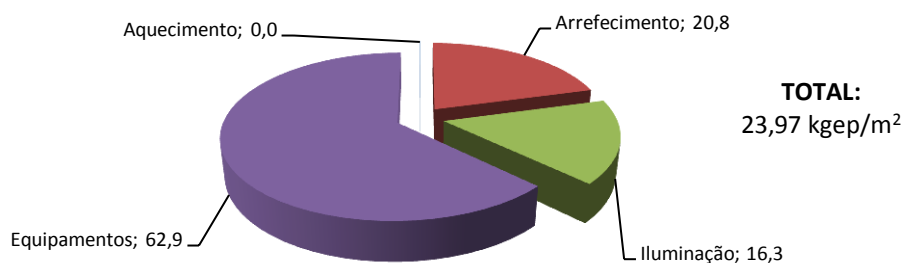


Sala 2 com um tubo de luz

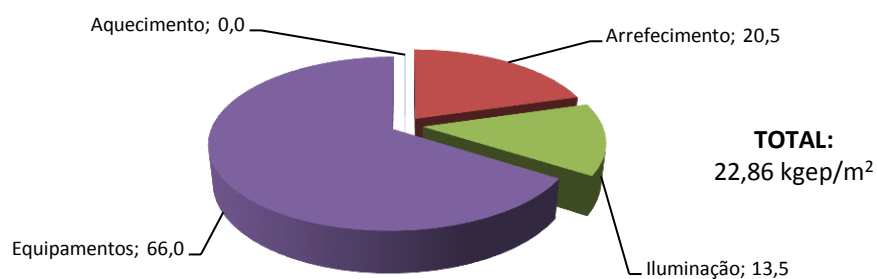


Sala 3

Sala 3 sem tubo de luz

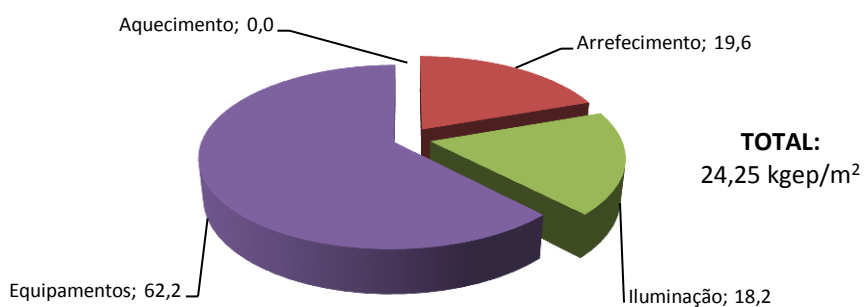


Sala 3 com um tubo de luz

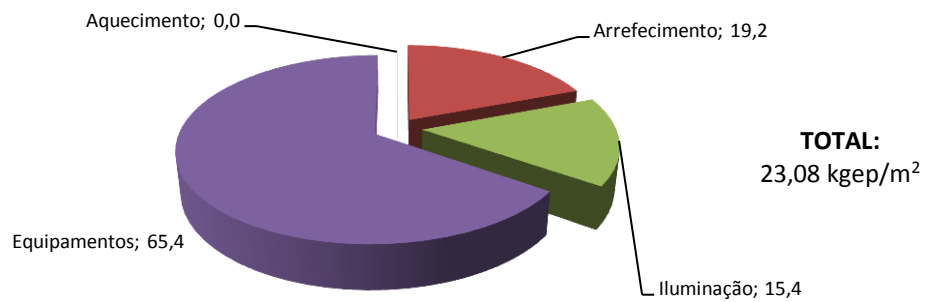


Sala 4

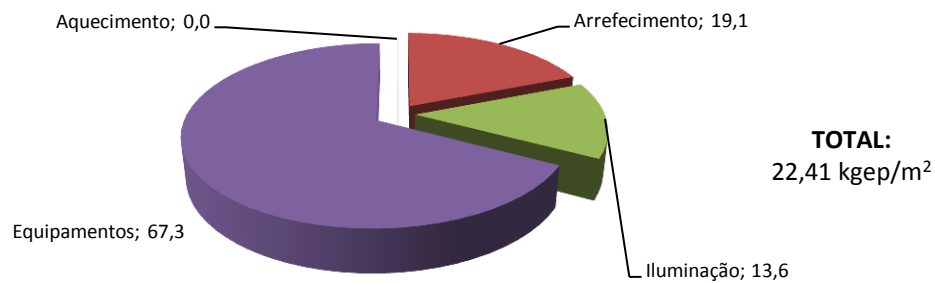
Sala 4 sem tubos de luz



Sala 4 com um tubo de luz

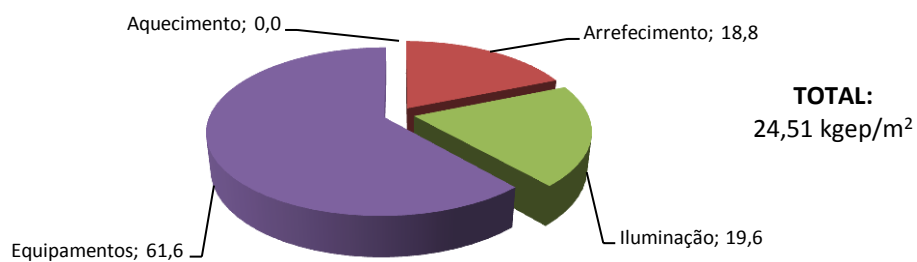


Sala 4 com dois tubos de luz

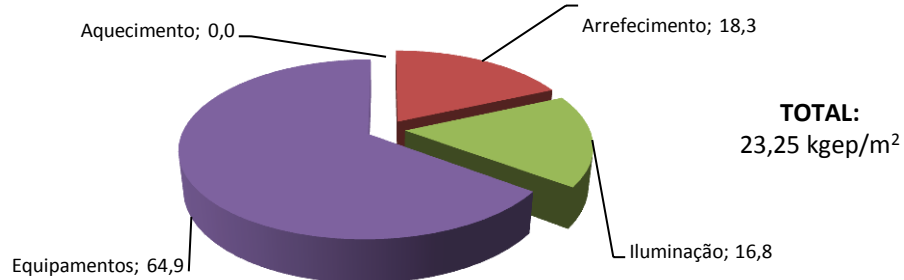


Sala 5

Sala 5 sem tubos de luz



Sala 5 com um tubo de luz



Sala 5 com dois tubos de luz

